Vol.2011-MBL-60 No.14
Vol.2011-ITS-47 No.14
2011/11/11

ソフトウェア無線を用いた無線アドホックネットワークにおける情報配信の屋内外実験環境の構築

金 原 辰 典[†1]　石 原 進[†2]

無線アドホックネットワークのプロトコルの研究を進めていく上で，シミュレーションと実環境双方からアプローチしていくことは重要である．筆者らの研究グループでは，車々間アドホックネットワーク（VANET: Vehicular Ad hoc NETwork）上での情報配信に Random Network Coding（RNC）と Opportunistic なデータ配信，ならびに車両密度や速度に応じたデータ配信制御を組み合わせることで，特定エリア内への低遅延で確実的な情報配信を可能とする手法を提案している．この手法は，シミュレーションによる性能評価によりその効果が確認されているが，実環境での評価がされていない．しかしながら，様々な条件を考慮した実環境での評価を行うには，移動端末の確保や広大な実験スペースが必要等の問題がある．本稿では，省スペースで端末密度や通信状態等の条件を柔軟に変更できる実験環境を整えるため，Wi-Fi や ZigBee 等の通信デバイスと比較して，柔軟に無線信号処理の変更が可能であるソフトウェア無線開発ツールキット GNU Radio を用いて実環境実験環境を構築した．その後，R2D2V の動作の一部である RNC と Opportunistic なデータ配信を組み合わせた情報配信動作を屋内外で固定端末を用いて実験を行い，省スペースでエラー発生率の高いアドホックネットワーク環境を模した実験が可能であることを確認した．

A study on indoor and outdoor experiment of data distribution for wireless ad-hoc network using software-defined radio

Tatsunori KIMPARA[†1] and Susumu ISHIHARA[†2]

To evaluate the performance of protocols on wireless ad-hoc networks, approaches both by simulation and experiment in a real environment are important. We have proposed a regional data distribution scheme which utilizes Random Liner Network Coding (RNC), an opportunistic data delivery strategy, and adaptive transmission control considering the density of vehicles and their moving speeds on Vehicular Ad hoc networks (VANETs). It is confirmed that the scheme can disseminate a data item rapidly and reliably by controlling the probability of sending a data item according to the vehicle density and vehicle speed through simulation. However it has not been fully evaluated in a real environment. To evaluate such a scheme in various condition, many devises, wide experiment field, and a lot of manpower are required. In this paper, we discuss using GNU Radio which can control various wireless signal processing more flexibly than off-the-shelf Wi-Fi and ZigBee devices to built a flexible and narrow space wireless network testbed. We evaluated a simplified prototype of R2D2V which disseminates a data item using RNC indoors and outdoors. We obtained a brief guideline of how to build an experimental environment of a wireless ad-hoc network in a small space.

1. はじめに

車々間アドホックネットワーク（VANET: Vehicular Ad hoc NETwork）は，2011 年 7 月の地上アナログ放送終了によって空いた周波数帯のうち 10MHz が車々間通信に割り当てられる計画があり，無線アドホックネットワークの応用事例として注目が集まっている．VANET はインフラを用いずに交通事故や渋滞といった情報を周辺車両に対して素早く配信可能であり，ドライバへの運転支援のための情報提供手法としての利用が期待されている．しかしながら，VANET 上の通信では，端末の移動に伴う周辺端末密度の変化により通信の信頼性が大きく左右されてしまう．端末が多く存在する場所で通信を行う場合，ランダムアクセス方式の MAC を用いる IEEE802.11 無線 LAN 規格による無線ネットワークでは，パケット同士の衝突が多発し通信の成功率が悪化する．また，端末が少ない場所では通信相手が存在しないために通信を行えない問題が発生する．このため，車両間で高い信頼性で情報配信を行うことは容易ではない．筆者らの研究グループでは，このような厳しい条件下で車両が入手した道路上の画像等を車々間で共有し，運転支援に供するシステム（リアルタイム画像カーナビ）の実現を目標として研究を進めている．これまでに筆者らは，車両密度のばらつきのある環境で，個々の車両がある地点で獲得した情報をその周辺エリアへ短時間かつ効率的に情報を配布することを目的とした手法 R2D2V（Random Network Coding

†1 静岡大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University
†2 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

© 2011 Information Processing Society of Japan

based Regional Data Distribution on VANET)[1] を提案している．

R2D2V は車両，あるいは路側の機器が生成した位置依存情報を，情報生成時点で情報生成位置の近傍（情報配信範囲）にいる全車両と，その後新たに情報配信範囲に入って来る車両に，短時間かつ効率的に配布することを目的として設計された手法である．R2D2V では各車両は Opportunistic なデータ配信[2] を採用している．この手法では，各車両が定期的に配信しているビーコンを受信することで隣接車両が存在することを把握し，その車両が必要なデータをブロードキャストによって送信する．データを送信する際，R2D2V ではパケット衝突やパケットロスに強く, 効率的な情報配信を行うために Random Network Coding（RNC）[3] による配信データの符号化・復号処理を採用している．それに加え，端末密度に応じたデータ配信確率の変更，車両速度に応じたビーコン送信間隔の変更を組み合わせて情報配信を行う．本手法はデータを確実かつ短時間で配信可能であることがシミュレーションにより示されている[1]．しかしながら，R2D2V の性能向上および実用化のためには，シミュレーションによる評価のみではなく実環境における動作確認も欠かせない．本稿では R2D2V を実無線環境で性能評価する第一段階として，R2D2V の基本動作である Opportunistic 型の情報配信に RNC を組み合わせた手法を固定端末を用いて実験を行う．

R2D2V を実無線環境で性能評価するには，端末密度，パケットの衝突，無線電波の干渉等様々な条件を変えた実験が必要となる．しかしながら，車両に通信端末を乗せて大規模実験を行うのは実験場所，実験人員，時間等の確保や労力の負担が大きいといった問題がある．そこで，繰り返し実験が可能で，室内等の限られたスペースで性能評価が可能な無線アドホックネットワーク実験環境を構築することを考える．このような実験環境を構築する場合，一般に販売されている IEEE802.11 及び 802.15.4 等の規格に沿った通信機器では，標準で決められている範囲内での処理しか行えないため，無線電波出力の詳細な設定ができず，通信条件を柔軟に変えて実験環境を構築するのが困難である．特に，電波到達距離が長い場合，マルチホップによる通信を想定したネットワークの実験環境を構築するために，最低でも各端末の電波到達距離より広い実験スペースが必要となる．そのため，VANET のようにデータ中継端末が頻繁に変化し，通信環境が頻繁に変更されるネットワークを想定した実験を行うのは容易ではない．そこで我々は，通信条件を柔軟に変更できる無線通信機が作成可能なソフトウェア無線開発ツールキット，GNU Radio[4] を用いて実験環境を構築した．

GNU Radio はオープンライセンスのソフトウェア無線開発ツールキットである．これまでの多くのソフトウェア無線の実現方式は，信号処理を FPGA 上で行い，ハードウェア記述言語で記載された処理内容を動的に変更していた．一方 GNU Radio では，アップ/ダウンコンバート，A/D，D/A 変換以外のほとんどの信号処理を PC 上の CPU で実行させる．信号処理用のソフトウェアモジュールの多くは C++で記述され，それらをオブジェクト指向のスクリプト言語 Python を用いて組み合わせることにより，無線システムを構築できる．アップ/ダウンコンバート，A/D，D/A 変換等は専用の外部ハードウェア USRP2（Universal Software Radio Peripheral 2）で行う．USRP2 では使用する周波数に応じたドータボードを使いわけることにより，様々な周波数帯を用いることが可能である．また，物理層の処理の多くはオープンソースのライブラリとして提供されているので，比較的容易に無線システムの構築が可能である．

有名なソフトウェア無線開発ツールキットに米ライス大学が開発した WARP[5] がある．WARP は FPGA ボードベースのソフトウェア無線開発プラットフォームで，GNU Radio に比べ高スループット，広帯域無線通信の開発が可能である．しかし，WARP 専用の FPGA ボードの値段は GNU Radio の専用無線端末である USRP2 より高価で，端末数の多い実験のコストが高い．そのため，比較的安価に利用可能な GNU Radio と USRP2 を採用した．

筆者らはすでに，GNU Radio と USRP2 を用いての実無線環境での実験を行なっている[6]．文献 6) では屋内の限られた実験スペースで一時的に実験環境を構築し，固定端末間での Opportunistic 型の情報配信に RNC を組み合わせた手法の評価を行った．実験により，RNC を用いることで，これを用いない場合に比べデータ配信効率が向上することを定性的に確認した．しかし，実験環境構築の指針が示されておらず，GNU Radio を用いた実験環境構築の可能性について言及されていない．本稿では，より広いパラメータ空間を用いた基礎実験により，想定する実験環境を構築するための指標となるパラメータを導き出し，実験環境構築方法の目安を示す．また，この目安に基づき，実験環境を構築し，Opportunistic 型の情報配信に RNC を組み合わせた手法の性能評価を行う．

以下 2 章では，VANET における情報配信手法を実環境で評価する際の問題点を述べ，3 章では，想定する実験環境構築のための指標となるパラメータを導き出すための基礎実験について述べる．4 章では，基礎実験の結果を元に行った，RNC を用いた Opportunistic 型の情報配信の屋内外実験について述べると共に，実験環境構築の指針を示す．最後に 5 章で本論文についてのまとめを述べる．

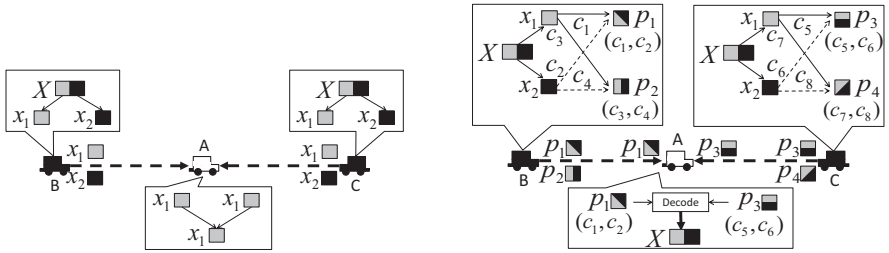
2. VANET における特定エリア内情報配信システム実環境評価の問題点

2.1 Random Network Coding（RNC）を用いた情報配信

RNC[3] 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，

© 2011 Information Processing Society of Japan

Vol.2011-MBL-60 No.14
Vol.2011-ITS-47 No.14
2011/11/11



(a) No RNC　　(b) With RNC

図 1　VANET 上での RNC 利用の利点

それらを有限体上で線形結合をとって Network Coding（NC）[7] を行う手法である．RNC を用いることで VANET のように車両同士が協調して情報を配信することが困難である環境でも高いデータ配信効率が期待される．VANET のように車両同士が協調して情報を配信することが困難な環境で RNC を用いることの利点は，最低限のパケットの受信で元のデータを復号することが出来ることにある．

例えば**図 1**（a）（b）のように，真ん中の車両 A がビーコンをブロードキャストし左右の車両 B，C がデータ$\boldsymbol{X}$を送信する場合を考える．まず，同図（a）の様にデータ X を 2 つに分割して送信する場合を説明する．車両 B，C がそれぞれ$\boldsymbol{X}$を 2 つに分割したパケット x_1, x_2 をブロードキャストする．このとき，パケットロスにより x_2 が車両 A に受信されなかったとすると，車両 A は元の$\boldsymbol{X}$を復号することができない．次に，同図（b）の様に RNC を利用した場合を説明する．車両 B，C は保持しているデータ$\boldsymbol{X}$を RNC によって符号化してブロードキャストする．具体的には，車両 B，C がそれぞれランダムに選択した係数ベクトル $(c_1, c_2), (c_3, c_4)$ および $(c_5, c_6), (c_7, c_8)$ と (x_1, x_2) との線形演算によって符号化パケット $(p_1, p_2), (p_3, p_4)$ を生成し，利用された係数ベクトルを付加してブロードキャストする．このとき，パケットロスにより p_2 と p_4 が車両 A に受信されなかったとする．車両 A では受信パケットに付加されている係数ベクトル (c_1, c_2) と (c_5, c_6) を参照し，それらが線形独立であれば元のデータ$\boldsymbol{X}$を復号することが可能となる．このように，パケットロスなどが発生してパケットが失われたとしても，RNC を利用することにより，2 つのパケットを受信するだけで元のデータを復号することが出来る．したがって，VANET のように通信の機会が限られていたり，パケットロスが起こりやすい環境でも，高い確率で配信されたデータを復元できることが見込まれる．

2.2　VANET を想定したプロトコルの実環境性能評価の問題点

実環境で R2D2V の性能評価を行うには様々な通信条件を想定した実験が必要である．VANET では，通信状態が常に良好に保たれることは困難であり，車両密度が高い場合にはパケット衝突によるパケットロスが多い，車両密度が低くデータ送信機会が限られている等，通信状態が悪い状況が頻繁に発生する．R2D2V では，このような厳しい条件下でも，情報発生元の周辺エリア内にいる全ての車両に対して短時間かつ効率的に情報を配布することを目的としている．そのため，R2D2V を評価するには，通信状態が良好な状態だけでなく通信状態が厳しい状況での性能評価も必要となる．

R2D2V の実験環境を一般に市販されている Wi-Fi や ZigBee の通信端末を用いて構築する場合を考える．Wi-Fi 等の通信端末は，それぞれの規格で定められている．通信出力も通信端末似依存した 4〜5 段階程度の調整しかできず，変調方式等の細かい無線電波信号処理を変更することが困難である．そのため，通信状態が良好ではない環境を想定した実験や，複数端末でのマルチホップネットワークを想定した実験を行うのが難しい．たとえば，データ送信端末と宛先端末が中継端末を介して通信を行う 2 ホップのマルチホップネットワークを構築することを考える．その際，各端末の電波到達距離が 50m であれば，2 ホップを行うにはデータ送信端末と宛先端末がお互いの電波到達距離内に存在しない 50m 以上の実験スペースが必要となる．更に，端末数を増やしたり，ホップ数を増やす等規模を拡大した実験を行うには，広大な実験スペースが必要となる．

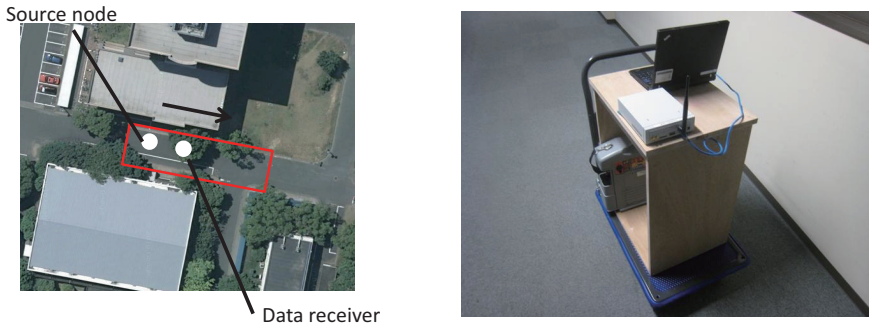
2.3　無線アドホックネットワーク実環境評価の関連研究

GNU Radio を用いて実環境評価が行われている研究事例として，Katti らの Analog Network Coding（ANC），ZigZag が挙げられる[8)9)]．ANC は NC を物理層で用いることで無線ネットワークにおけるスループットを向上させる技術である．ZigZag は WLAN において，異なるタイミングで衝突した 2 つのパケットの壊れていないフレームを利用して，衝突前の正しいパケットへと復号する技術である．文献 8) では 5 台の USRP を X 型に配置して実環境評価がなされている．また，文献 9) では，14 台の USRP を大学敷地内の複数の建物内に配置し実環境評価が行われている．これらは物理層の技術の開発事例である．そのため，様々な通信状況を想定した実験環境構築の指針は示されていない．

狭い範囲で多数のノードによるマルチホップ無線ネットワークの実験を可能としているテストベッドの例としては，ラトガーズ大の ORBIT やオハイオ州立大の KanseiGenie が挙げられる[10)11)]．ORBIT は建物の一室に動的に制御可能な 400 の無線ノードを設置し，様々なトポロジ，条件を想定した無線通信実験を可能とするシステムである．各ノードに

© 2011 Information Processing Society of Japan

Vol.2011-MBL-60 No.14
Vol.2011-ITS-47 No.14
2011/11/11



（a）屋外実験場所　（b）送信側端末

図 2　基礎実験風景

は 802.11a/b/g の無線カードが搭載されている．更に，ZigBee と Bluetooth の通信も可能であり，一部に GNU Radio も用いられている．また，制御可能な移動ノードを用いることで，MANET や VANET などの移動を含む実験も可能となっている．KanseiGenlie は，802.11，802.15.4 及び，XSM，TelosB，Imote2 といった，様々な通信プラットフォームが利用できる Kansei node 96 台から構成されているテストベッドである．こちらも ORBIT と同様に 1 室内に端末を配置し，96 台の Kansei node を動的に制御することで様々な無線センサーネットワークを想定した実験を可能とする．しかし，このような大規模なテストベッドを作成するのは管理費，維持費等の金銭コストが高く，文献 10)11) のような据え置きの大規模なテストベッドを実現するのは非常に困難である．

3. GNU Radio と USRP2 を用いた実環境評価のための基礎実験

限定されたスペースで無線アドホック通信の実験環境を構築するためのパラメータの目安を得るために，屋内外で基礎実験を行った．基礎実験では GNU Radio の各種パラメータを変更し，パケットが復調可能な距離を調査した．

3.1 GNU Radio と USRP2 の利用

GNU Radio[4] とは，オープンライセンスのソフトウェア無線システム開発環境であり，専用無線通信デバイス USRP（USRP2）を用いることで無線送受信機を作成可能である．PC 上では，各処理を行うブロックを繋ぎ合わせてフローグラフを作る．例えば，デジタル変調を用いる場合，GMSK，DBPSK，DQPSK 等様々な変調方式が用意されている．その後，PC 上で処理されたデータが通信デバイスへと送信される．USRP2 では複素信号のサンプル（I/Q 各 16 ビット）を Gigabit イーサーネットを通して受け取り，FPGA で 100M サンプル/s の信号に補間する．そして，アップコンバージョンと D/A 変換が行われ，RF 回路を通して無線信号が出力される．また，GNU Radio と USRP2 の通信には Gigabit イーサネットが用いられている．そのため，1Gbps 以上の通信が不可能であるため，GNU Radio から USRP2 に送られるサンプルは 1/4〜1/512 に間引されて送られる．

USRP2 はドータボードの変更で様々な周波数帯域（50M〜5.85GHz）を変更可能である．周波数 50M〜860MHz（TV の周波数帯）の電波受信専用ボードや，周波数 2.4G〜2.5GHz および 4.9G〜5.85GHz の電波送受信が可能なボード等がある．

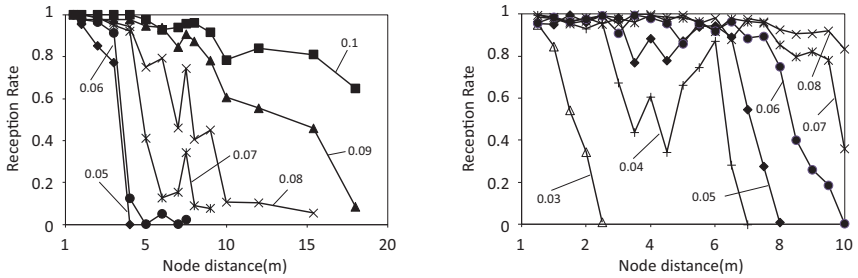
3.2 基礎実験

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，GNU Radio 内のパラメータにより，正弦波信号の振幅を変更し，パケットの復調が可能な距離がどのように変化するかを計測した．通信端末には USRP2 を 2 台使用し，大学内の敷地内の屋外（**図 2** (a)）と教室で測定した．ドーダーボードは周波数 2.4GHz〜2.5GHz および 4.9G〜5.85GHz 送受信用の XCVR2450 を用いた．XCVR2450 の最大電波出力は利用する周波数帯により異なり，2.4G〜2.5GHz で 100mW，4.9G〜5.85GHz で 50mW となっており，送信ゲイン 0〜30dB，受信ゲイン 0〜91dB となっている．アンテナは XCVR2450 が利用可能な周波数帯をカバーする利得 3dBi 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，もう一方は受信側の端末とし，台車で移動できるようにした（図 2（b））．端末間の距離を変えながら，各距離で 3000 個のパケットを送信し，パケットの受信成功率を判定した．

受信成功率を測定するために，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である benchmark_rk と benchmark_tx を用いた．これらのプログラムは，パケットを生成・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．プログラムを起動する際，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パラメータを設定することが出来る．今回の基礎実験では，パケットサイズ 1500bytes，中心周波数 5.11GHz，ビットレート 500Kbps，送信ゲイン 0.01dB，受信ゲイン 75dB とした．変調方式には DBPSK を用いて，正弦波振幅 0.03〜0.1（1 が仕様上の最大値）で実験を行った．また，連続稼動をしていると，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．そのため，定期的に中心周波数の調整を手動で行った．

© 2011 Information Processing Society of Japan

Vol.2011-MBL-60 No.14
Vol.2011-ITS-47 No.14
2011/11/11



（a）屋外測定結果　（b）屋内測定結果

図 3　各端末間距離における受信率

大学敷地内で行った屋外測定実験では，実験中に人や車が端末付近を通ることがあった．人や車が端末付近を通ると，復調できていなかったパケットの復調に成功したり，復調できていたものができなくなるなど，パケットの送受信に大きな影響があった．以下で示す結果は人や車が端末付近に存在しない時に測定したものである．

送信信号の振幅が 0.05〜0.1 での，各距離でのパケット受信率を**図 3** に示す．縦軸は受信率を表しており，送信された 3000 個のパケットの受信成功率である．横軸は受信端末-送信端末の距離である．測定時の気温は 20 ℃，湿度は 55%であった．

図 3（a）に，屋外での基礎実験で得られた各振幅値におけるノード間距離に対するパケット受信率（受信成功率）を示す．また，5〜10m 付近に注目すると，0.08 以下では受信率の減少が大きい．7m 付近のように局地的に受信率が向上する場所があるが，これはフェージングによる影響だと考えられる．

次に屋内での基礎実験について述べる．静岡大学における小さい教室の広さは 13m × 6m 程で，大きな教室であれば 17m × 8m 程である．このような実験スペースで 2 ホップおよび 3 ホップを想定した実験を行うためには，パケット復調可能距離がおよそ 4m 以下であることが望ましい．図 3（a）より，屋外でパケット復調可能距離を 4m 以下にするには，振幅を 0.7 以下にすれば良いとわかる．しかしながら，屋内では屋外よりもフェージングの影響が大きく，パケット受信率が大きく変化すると考えられる．そこで，広さ 17m × 8m の教室で屋外と同様にパケット受信率を測定した．

図 3（b）に屋内での受信成功率を示す．受信率と振幅の値に注目すると，屋外に比べパケットを復調可能な距離が伸びているのがわかる．特に端末間距離 10m でパケット受信率に注目すると，振幅の値が 0.07 でも 10m の地点でパケットを復調できていることがわかる．屋外では図 3（a）に示すように，振幅の値が 0.07 の時 8m 以下でなければパケットを復調できない．それに加え，端末間距離 4〜6m 付近では急激に受信率が変化している．このことより，屋内ではフェージングによる影響が非常に大きいとわかる．また，図 3（b）に示す結果は，教室の中央付近でなるべく壁から離れた場所で行ったものである．壁に近い状態でパケット送受信の測定を行うと，数 cm 毎にパケット復調が不可能になる場所が存在し，全く通信が安定しなかった．屋内で実験を行う際は屋外よりも振幅を 0.01〜0.02 下げ，出来るだけ壁から離れた場所で実験を行うのが良いことが確認できた．

4. GNU Radio を用いた屋内外実験

3 章で行った基礎実験により得た各種パラメータとパケットの復調が可能な距離を元に，パラメータを設定し，GNU Radio と USRP2 を用いて屋内外で実験環境を構築し Opportunistic 型のデータ配信と RNC を組み合わせた手法を評価した．

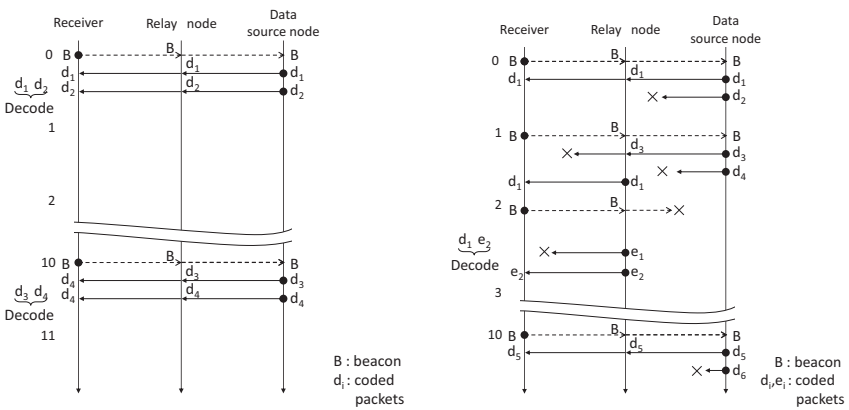
4.1 実験方法

R2D2V における Opportunistic 型のデータ配信では，データ保持端末が他端末から定期的に配信されているビーコンを受信すると，データ保持端末はブロードキャストによりデータ配信動作を行う．また，データ生成端末以外の端末も中堅端末としてデータを送信する機会を持つ．そこで，実験には，データ生成端末，中継端末，受信端末の動作が異なる 3 種類の端末を用いた．データ生成端末は 10 秒毎に 2000bytes のデータを生成する．中継端末はビーコンの送信，データの生成を行わず，中継処理を行う．受信端末はデータを取得するまで 1 秒毎にビーコン送信を行う．データ生成端末と中継端末は受信端末が送信するビーコンを受信することで保持データを送信する動作を行う．

図 4 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 4（a）は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）で送信した最初のビーコンに対して，データ生成端末が符号化パケット 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てその後，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 4（b）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のうち，d_2 がどの端末にも届かなかったとする．受信端末は元のデータを復号できないため 1 秒にもう一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，両端末ともデー

© 2011 Information Processing Society of Japan

Vol.2011-MBL-60 No.14
Vol.2011-ITS-47 No.14
2011/11/11



（a）ビーコン送信回数 1 回でデータを復号する場合　（b）通信エラーが発生する場合の一例

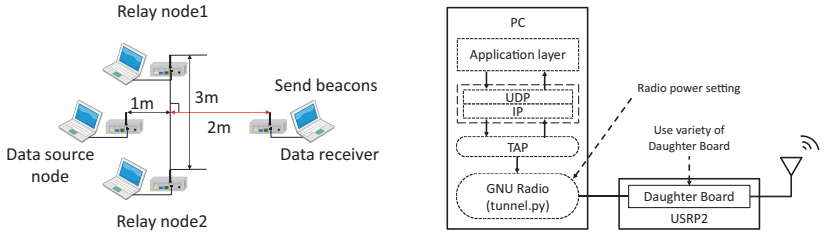
図 4　実験タイムチャート

タを送信する．受信端末では d_1 の受信に成功するが，d_1 のみを保持しているため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．2 秒の時点では，中継端末のみビーコンを受信できたとする．その際，中継端末では d_1, d_3 から元のデータを復号し，その後新たに符号化パケット e_1, e_2 を生成し，ランダム時間待ってからそれを送信する．受信端末では，e_2 を受信し，d_1, e_1 より元のデータを復号してビーコン送信を 10 秒まで停止する．上記の例では RNC を用いたを用いた例であるため符号化パケットが送信されているが，RNC が用いられない場合は断片をそのまま送信する．

以上の動作では，1 つのデータに対して最大 10 回のビーコン送信を行う．そこで，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．10 回より多くビーコンを送信したセットは失敗とみなした．

4.2 実験環境

基礎実験により，屋内外でのパケット復調可能距離と各パラメータの値の関係性が示された．送信ゲイン 0.01dB，受信ゲイン 75dB，ビットレート 500kbps，変調方式 DBPSK とした時，正弦波の振幅を変えることでおおよそのパケット復調可能距離を調整可能である．たとえば，図 3 より振幅の値を，屋外ならば 0.05〜0.07 程度，屋内ならば 0.04〜0.05 程度に設定することでパケット復調可能距離を 4m 程まで絞ることが可能である．しかしながら，室内の広さ，障害物の有無等の実験環境により，通信状態が異なりパケット復調可能距離が前後してしまう．そのため，おおまかな目安として上記の値を利用し，実験を行う際に



（a）端末の配置　（b）システム構成

図 5　実験環境

細かな設定を行う必要がある．また，人や車など，端末の周りで移動する物体があると通信状態が安定しないため，なるべく影響を受けにくい場所で行うのが望ましい．

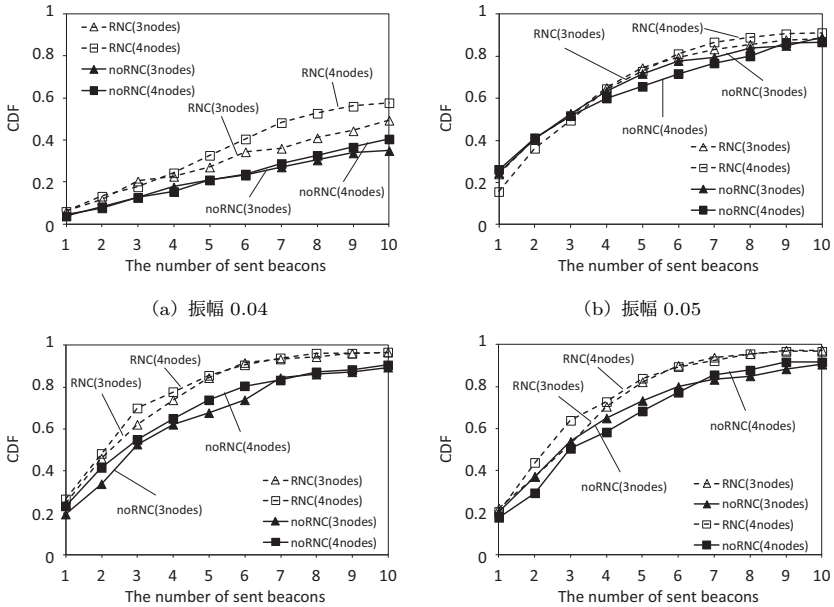
実験には，基礎実験と同様のドーターボードとアンテナを利用した．パラメータは基礎実験と同様に中心周波数 5.11GHz，ビットレート 500Kbps，送信ゲイン 0.01dB，受信ゲイン 75dB とし，振幅を屋内実験では 0.04〜0.07，屋外実験では 0.06〜0.07 とした．変調方式は DBPSK を用いた．パケットは 1075bytes のデータパケットと，75bytes のビーコンの 2 種類を用いた．また，実験に先立って各端末間で時刻の同期を行っている．測定は中継端末が 1 台と 2 台の場合それぞれ RNC 有り・無しの計 4 パターンを各 180 セット試行した．

屋外では図 2（a）に示した四角の中，屋内は 17m × 8m の教室で実験を行った．人や車の影響をなるべく受けないように屋外実験は深夜，屋内実験は休日に行った．実験では**図 5**（a）の様に端末を配置し，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した．端末を配置する際，パケット復調不可能な場所が存在した．そのような場合には端末の位置を少しずらし，パケットを復調できるように端末を移動した．

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 IP を用いた通信プログラムでの通信を USRP2 を介して行うために TAP を用いた．TAP とは，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．図 5（b）アプリケーション層のプログラムとして，Opportunistic 型のデータ配信に RNC を用いた UDP ブロードキャスト通信プログラムを実装した．UDP 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[12]．

© 2011 Information Processing Society of Japan

Vol.2011-MBL-60 No.14
Vol.2011-ITS-47 No.14
2011/11/11



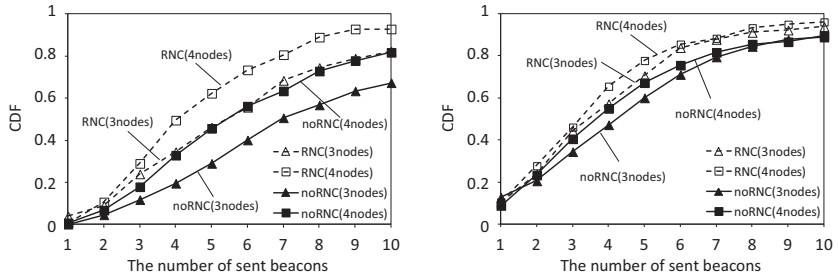
（a）振幅 0.04　（b）振幅 0.05　（c）振幅 0.06　（d）振幅 0.07

図 6　各データ受信に要したビーコン送信回数の累積分布（屋内）

4.3　屋内外実験

図 6 に屋内，**図 7** 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における受信率の累積度数分布を示している．ビーコン送信回数 10 回の地点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，各実験での受信端末と他端末間でのビーコンのロス率を**表 1**，データパケットのロス率を**表 2** に示す．これらの値は，各振幅における実験試行中のパケットロス率である．測定時の気温は 25 ℃，湿度は 27%であった．

図 6，7 より 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，図 6，7 で最終受信率を比較すると，より振幅が小さい時（屋内では振幅が 0.04 の場合，屋外では振幅が 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 1，2 よりこれらの振幅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通信状況が悪い状態ほど RNC の効果が高いことがわかる．



（a）振幅：0.07　（b）振幅：0.08

図 7　各データ受信に要したビーコン送信回数の累積分布（屋外）

表 1　受信端末－他端末間でのビーコンロス率

	振幅	受信端末－生成端末	受信端末－中継端末 1	受信端末－中継端末 2
屋内	0.04	57.9%	93.4%	82.9%
	0.05	33.5%	23.7%	100%
	0.06	50.2%	36.1%	59.7%
	0.07	31.7%	23.2%	20.6%
屋外	0.07	48.5%	14.5%	11.5%
	0.08	45.4%	15.5%	10.1%

表 2　受信端末－他端末間でのデータパケットロス率

	振幅	受信端末－生成端末	受信端末－中継端末 1	受信端末－中継端末 2
屋内	0.04	78.3%	91.3%	74.1%
	0.05	60.6%	83.8%	100%
	0.06	69.0%	68.8%	77.4%
	0.07	64.3%	66.7%	84.9%
屋外	0.07	92.3%	73.1%	71.7%
	0.08	71.5%	69.2%	72.2%

図 6（b）を見ると，他と比べ端末数による受信率の差が殆ど見られない．この理由は，表 1，2 の振幅 0.05 の受信端末－中継端末 2 間のパケットロス率が 100% となっていることより，常に端末数 3 台で実験が施行されていたためである．実験の施行前には正常に受信端末－中継端末 2 間で通信が行われていたが，実験中に中心周波数がずれたため，正常に通信が行われなくなったと考えられる．これは本来再実験の対象であるが，USRP2 を用いた実験の参考としてあえて示すものである．

4.4　考　　察

図 5（a）に示した端末配置では，受信端末－生成端末間の距離よりも受信端末－中継端末 1，2 間の距離の方が短い．そのため，直感的には受信端末－中継端末間の受信電力のほうが強く，パケットロス率が低いと考えられる．表 1，2 の屋外での振幅 0.07 および 0.08 のロス率を見ると受信端末－生成端末間の方が受信端末－中継端末間に比べパケットロス率が高く，直感的な予測通りの結果が見られる．一方，表 1，2 の屋内での振幅 0.04〜0.07 の

© 2011 Information Processing Society of Japan

場合，屋外の場合とは逆に受信端末－中継端末間の方のパケットロス率が高くなっている．この原因としては，屋内のフェージングによる影響が屋外に比べて大きいことが考えられる．そのため，屋内では端末間の距離を単純に短くしても通信状況が良好になるわけではないため，端末間の通信状況を端末の位置関係だけで制御することが困難である．

表 1，2 中の屋内と屋外の振幅の変化によるパケットロス率の変化に注目すると，屋内での振幅 0.04〜0.07 のパケットロス率の変化が屋外の振幅 0.07〜0.08 に比べ大きいことがわかる．特に表 2 の受信端末－生成端末の振幅 0.04〜0.06 を見ると，受信率が 5〜10%上下している．屋内ではフェージングの影響が大きいため，わずかな振幅等の違いにより受信端末における電波強度が大きく変化してしまう．しかも，今回の実験の様に電波出力を絞ると更にその影響が大きい．そのため，屋内では端末の位置を固定した状態で単純に振幅，送信ゲイン等のパラメータを変化させることによる通信状況の調整が困難である．一方屋外では，振幅の変化によるパケットロス率の変化が緩やかであるため，通信状況の調整が行い易い．

屋内ではフェージングの影響が大きく，パラメータや端末設置による通信状況を想定通りに調整することが困難であった．しかし，エラー発生率の高い環境を狭いスペースで一時的に構築し，プロトコルの挙動を確認することは可能である．ただし，端末を増やした実験環境を構築することを考えると，各端末間の通信状況の調整が複雑となり，想定する環境を構築するのが困難である．そのため，屋内で実験の規模を拡大することは難しい．屋外ではフェージングの影響が少なく，パラメータ変更に対して通信状況の変化の幅が緩やかである．そのため，端末数が増えたとしても，細かくパラメータを設定することは比較的容易だと考えられる．

5. ま と め

本論文では，VANET における RNC を用いた特定エリア内情報配信手法 R2D2V の実環境評価を目的として，GNU Radio と USRP2 を用いて，限定されたスペースで通信状態が良好でない場合を考慮した実験が行えるような無線アドホックネットワーク実験環境構築の方法を検討した．基礎実験により，信号の振幅とパケット復調可能距離の関係を計測し，その結果を元に屋内外の省スペースで実験環境を構築した．実験では R2D2V の基本動作である Opportunistic 型のデータ配信に RNC を組み合わせた手法を評価した．実験より，特に通信状態が悪いとき RNC を用いることで受信率が向上することが確認できた．しかしながら，一連の実験を通して一般の屋内ではフェージングの影響が強く，通信状態の細かな調整が困難であり，プロトコルの限定された動作確認には利用できるが，規模を拡大した実験を行うのは難しいことが確認された．一方屋外では比較的容易に通信条件の細かなが可能であることがわかった，今後は端末数を増やす等拡張した実験を屋外で行なっていく予定である．

謝辞　本研究は，科学研究費補助金基盤研究（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) Kusumine, N. and Ishihara, S.: R2D2V: RNC based Regional Data Distribution on VANETs, *Proc. IEEE Vehicular Network Conference* (*VNC2010*), pp.271–278 (2010).
2) Vahdat A. and Becker. D.: Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks, Technical Report CS-2000-06, Duke University, (2000).
3) 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).
4) GNU Radio: ⟨http://www.gnuradio.org/⟩ (accessed 2011-10-5).
5) WARP:⟨http://warp.rice.edu.⟩ (accessed 2011-10-5).
6) 金原 辰典, 楠嶺生宏, 石原進: VANET におけるランダムネットワークコーディングを用いた特定エリア内情報配信システムの GNU Radio/USRP2 を用いた実環境評価, マルチメディア，分散，協調とモバイル (DICOMO2011) シンポジウム論文集, Vol.2011, No.1, pp.595-603 (2011).
7) 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).
8) Katti, S. Gollakota, S and Katabi. D.: Embracing Wireless Interference: Analog Network Coding, Proc. ACM SIGCOMM 2007, pp. 397–408 (2007).
9) Gollakota, S. and Katabi, D.:ZigZag decoding: Combating hidden terminals in wireless networks, Proc. ACM SIGCOMM 2008, pp.159–170 (2008).
10) 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. Wireless Communications and Networking Conference, vol.3, pp.1664–1669 (2005).
11) Ertin, E. and Arora, A. and Ramnath, R. and Naik, V. and Bapat, S. and Kulathumani, V. and Sridharan, M. and Zhang, H. and Cao, H. and Nesterenko, M.: Kansei: a testbed for sensing at scale, Proc. 5th Conf. Information Processing in Sensor Networks, pp.399–406 (2006).
12) 石原進: USRP / GNU Radio を利用したマルチホップ無線通信の実装, 電子情報通信学会 2010 ソサイエティ大会，チュートリアル講演，BT–3–2 (2010).

© 2011 Information Processing Society of Japan