無線通信テストベッドの構築

- GNU Radio と USRP を用いたアドホックセンサネットワーク -

坂本 浩† 星川 雄大†† 萬代 雅希† 石原 進†††
四方 博之†††† 小花 貞夫†††† 渡辺 尚†††

近年，無線通信ネットワークにおいて他ノードを中継することでデータ送信を実現するアドホックネットワークやセンサネットワークが注目されている．そしてそれについて多くの研究がなされているが，性能評価実験ではシミュレーション評価が多いため，実機での確認が重要であると考えられる．そこで，最近登場したソフトウェア無線プラットフォーム GNU Radio と USRP2 (Universal Software Radio Peripheral)が，各種の研究に利用される可能性を秘めている．本稿ではこれらを用いた無線通信テストベッドを構築した．これにより，従来新たに基板を起こす必要があり困難だった無線物理層技術の研究開発の低コスト化が図れ，企業や大学などの研究教育機関での利用が進むことが期待される．

本デモ発表では，上記プラットフォームを利用して無線ネットワークのプロトコル評価を効率的に行うことができるテストベッドを構築した．このテストベッドを利用することで，例えば，パッチアンテナと組み合わせることによる指向性通信，ネットワーク上のセンサノードの通信状況監視，パケットリカバリー等が行える．

Construction of the wireless communication test bed

- Ad hoc sensor network using GNU Radio and USRP -

HIROSHI SAKAMOTO† TAKEHIRO HOSHIKAWA††
MASAKI BANDAI† SUSUMU ISHIHARA†††
HIROYUKI YOMO†††† SADAO OBANA††††
TAKASHI WATANABE†††

† 静岡大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University
†† 静岡大学大学院工学研究科システム工学専攻
Graduate School of Engineering, Shizuoka University
††† 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University
†††† (株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所
ATR Adaptive Communications Research Laboratories

Ad hoc and sensor networks attract attention. Generally, performance of a protocol in ad hoc and sensor networks is evaluated by computer simulations. However, implementation on a real system is necessary for developing applications, which leads high cost. Recently, the software radio platform called GNU radio and the universal software radio peripheral (USRP) are provided into the market. We, researchers in universities or companies, can easily get the reasonable platform for implementing medium access control (MAC) and radio physical protocols in a real system. In this demonstration, we implement a testbed by means of the GNU radio and USRP platform. By using the testbed, we can realize some experiments such as a directional communications with patch antennas, communications monitoring of sensor nodes, partial packet recovery (PPT).

1. はじめに

近年，無線アドホックネットワークやセンサネットワークにおいて様々なプロトコルの研究が盛んに行われている．多くの研究において，プロトコルの動作検証および性能評価は主に計算機シミュレーションによって行われているため，実環境では期待する結果が得られない可能性が指摘されている．この問題に対処するために、最近では実環境評価を行うテストベットとして Mica mote[1]，U-cube[2]，UNAGI[3]などが開発されている．これらのテストベッドを利用することで，Mica mote を利用した消費電力評価[4]や，アドホックネットワークにおいては指向性通信が可能な UNAGI を利用した指向性 MAC プロトコルが実装評価されている[5]．しかし，このそれらは既存の Zigbee 無線モジュールを利用しているため，物理層や MAC 層のプロトコルは Zigbee で規定されており，ZigBee の上で提案 MAC プロトコルを動作させる必要があるなどの問題点がある．

本稿では最近注目されているソフトウェア無線プラットフォームである GNURadio[6]と USRP2[7]を利用し，これまでは困難であった物理層プロトコルや提案 MAC プロトコルの実装をソフトウェアでプログラミングできるテストベットを構築する．

2. テストベッド

本テストベッドでは，PC 上で動作するソフトウェアとして GNU Radio を利用し，無線通信のフロントエンドとしてのハードウェアに USRP2 を用いる．ソフトウェア無線では，ADC(Analog to Digital Converter)までをハードウェアで処理し，それ以降の処理をソフトウェアで行う．そのため，変調方式などの物理層技術をソフトウェア側で変更することが可能である．

2.1 GNU Radio

GNU Radio はソフトウェア無線用のフリーウェアであり，Python と C++で記述されている．変調方式などのモジュールを C++で記述し，それらモジュールを結合し 1 つのアプリケーションとしてプログラムを接続するのに Python が利用されている．この接続には, SWIG というオープンソースが利用されており, これによって C++と Python の橋渡しを行っている．Python によって C++モジュールを組み替えることで異なるアプリケーションの実装を簡単に行うことが出来る．ソフトウェアの詳細などは，http://gnuradio.org/trac に記載されている．

2.2 USRP2

USRP2 は，GNU Radio の無線フロントエンドとして開発されたハードウェアである．図 1 に USRP2 とドーターボードの概観を示す. http://gnuradio.org/trac/wiki/USRP2 において詳細等が公開されている．

図 1：USRP2 とドーターボード(XCVR2450)の概観

本体基板に周波数ごとに対応したドーターボードを設置することで，DC から 3GHz や 4.9GHz から 5.85GHz 間の周波数変更が可能である．また周波数の細かな設定についてはソフトウェアでオプションとして設定する事も可能となっている．例えば，図 1 の XCVR2450 は 2.4GHz 帯と 5GHz 帯に対応したドーターボードであり，2.3GHz から 2.9GHz までと 4.9GHz から 5.85GHz までの送受信が可能である. また USRP2 は SD カードに FPGA の構造やファームウェアに関するプログラムを書きこんでおき，USRP2 とギガビットイーサで接続することで動作させる. USRP2 の諸元を表 1 に示す.

表 1：USRP2 諸元

インターフェース		Gigabit Ethernet
FPGA		Xilinx Spartan 3-2000
RF Bandwidth to/from host		25 MHz @ 16bits
AD/DA	ADCs	Dual 100 MHz 14-bit
	DACs	Dual 400 MHz 16-bit
ドーターボード設置数		1 TX, 1 RX
SRAM		1MByte
電力		6V, 3A

また, USRP 2 はドーターボードによって送信電力が異なるが，図 1 の例に示すものでも 100mW で送信する事が可能であるため，電波法の規定で技術基準適合証明などの取得が必要となる．そこでに示すような電波暗室を利用して送受信等の実験を行う．

図 2：電波暗室による実験

2.3 構成

GNU Radio は PC 上で動作するソフトウェアであり，PC と USRP2 はギガビットイーサネットケーブルで接続される．PC と USRP2 の構成を図 3 に示す．なお，ギガビットイーサでないと PC で認識されない．

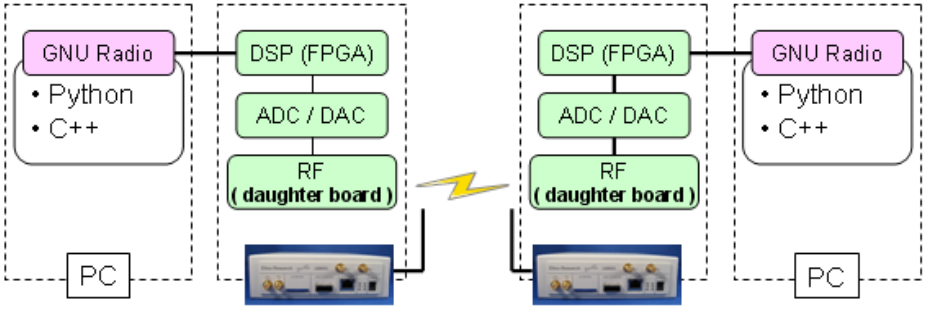


図 3：GNU Radio と USRP2 の構成

無線通信は, PC 上で GNU Radio の Python プログラムを実行することで開始される．その際に，周波数・変調方式・データサイズ・ビットレートなどを指定する事ができる．それらのオプションによって，生成されるパケットをイーサネットケーブルで USRP2 へ送り，USRP2 で電波として送信される．また，アンテナの送受信の切り替えもソフトウェアで設定することが必要となっている．その設定をプログラム中に変更することで，受信と送信の状態を切り替えることができる．

3. テストベッドを使用した送受信

本テストベッドによる簡単なパケットの送受信と ZigBee 電波の受信について示す．

3.1 パケットの送受信

テストベッドを 2 台使用して，片方向でのパケット送受信を行った．送受信の概観を図 4 に示す．また，その際のパラメーターを表 2 に，パケット内容を表 3 に示す．

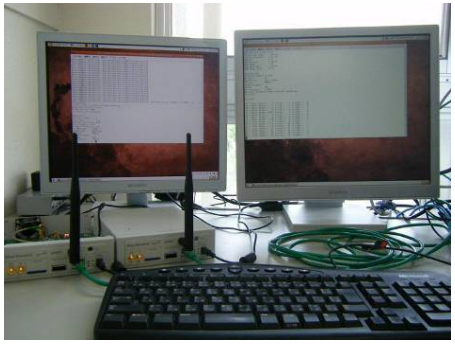


図 4：パケット送受信の概観

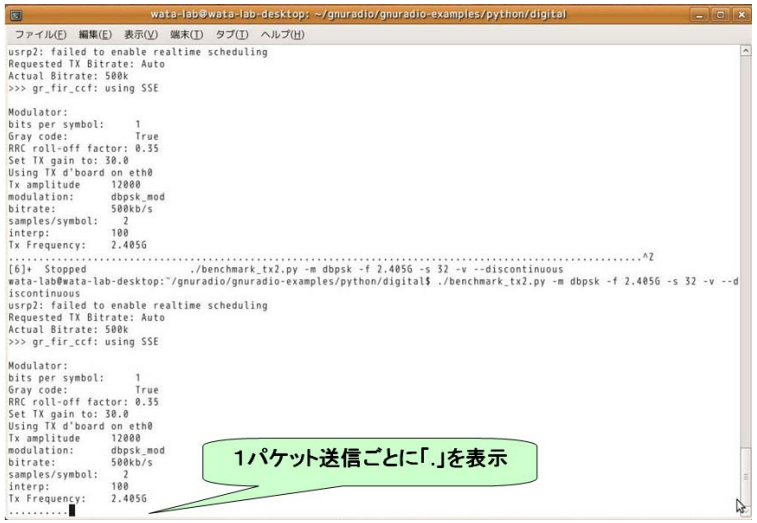
表 2：送受信パラメーター

周波数	2.405 GHz
変調方式	DBPSK
パケットサイズ	32 Byte
ビットレート	500 kbps

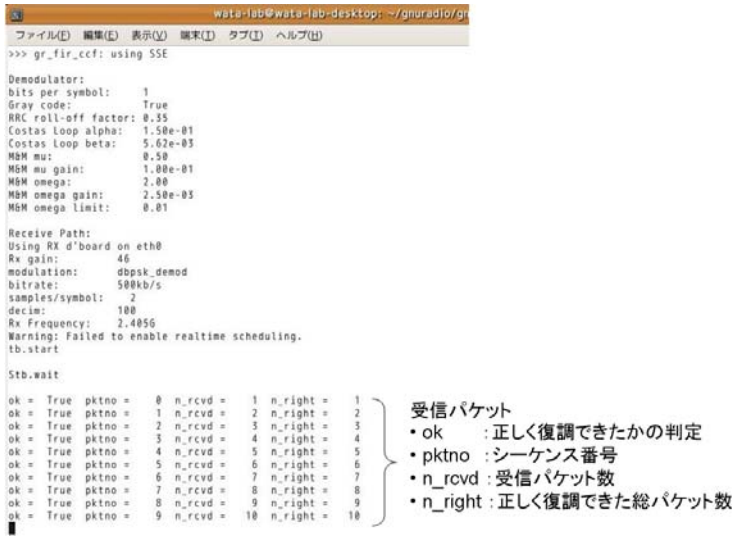
表 3：パケット内容

PHYヘッダ	Seq#	ペイロード長	ペイロード	CRC

パケットには PHY ヘッダのプリアンブルから CRC の値まで格納されている．このパケットを送信することで, 受信側でシーケンス番号や CRC によるペイロードの確認を行う．送受信の際のＰＣでの表示を図 5（A）の送信側では，1 パケット送信されるごとに「.」が表示されている．また図 5（B）の受信側では，パケットを受信するごとに，復調判定・シーケンス番号・総受信パケット数・総復調パケット数を表示している．総復調パケットは，復調判定で正しいと判断されたパケットの総数である．図 5 の結果から，簡単なパケットの送受信が実装できた．今後は，双方向で送受信ができるように，テストベッドを構築していく．



（A）送信画面



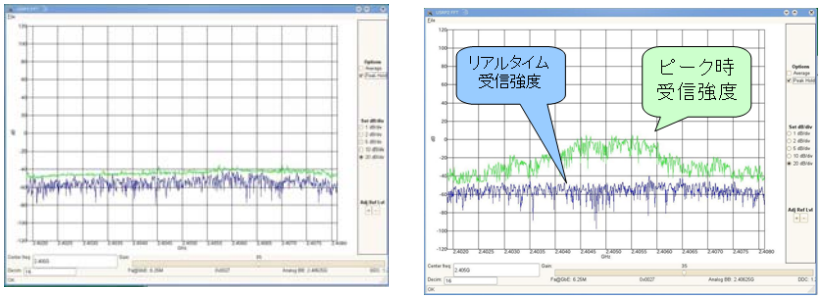
（B）受信画面

図 5：パケット送受信時の表示

3.2 ZigBee 電波受信

Mica mote を利用して ZigBee 電波のスペクトラム観測を行った．その際の概観を図 6 に示す．ZigBee に対応したパケットの受信が未実装であるため，現段階では ZigBee 電波のスペクトラム観測を行った．その結果を図 7 に示す．図 7 は，受信強度を示したグラフであり，青と緑の線はそれぞれリアルタイム強度と観測開始からのピーク強度を示している．図 7（A）では，Mica mote を動作させない状態の波形を示し，図 7（B）が Mica mote を動作させた状態である．Mica mote がパケットを送信する度にリアルタイム強度がピーク強度と同等の強度を示すことが観測された．今後は，Mica mote の電波をパケットとして受信できるようにソフトウェアを構築する．

図 6：ZigBee 受信概観



（A）通常時　　(B）Mica mote 動作時

図 7：ZigBee 電波受信グラフ（受信強度）

4. デモ発表内容

本テストベッドを利用して実装可能なシステム例を以下に示す．

4.1 パッチアンテナを利用した指向性通信

USRP2 のアンテナ部分を図 8 に示すようなパッチアンテナに変えることで，指向性通信を実装する．図 8 のパッチアンテナを利用することで，一般的なダイポールアンテナが 360° 送信するのに対して，パッチアンテナではアンテナ面が向いている方向に半円状に送信することや，より細いビームで送信することが可能となる．このように指向性通信を行うことで，図 9 で示される空間利用効率の向上や通信距離の拡張効果を得ることができる．

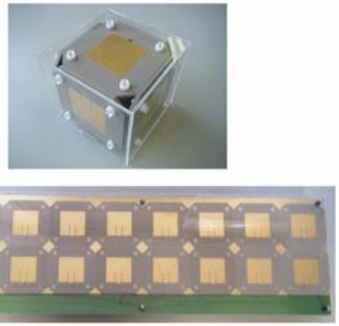
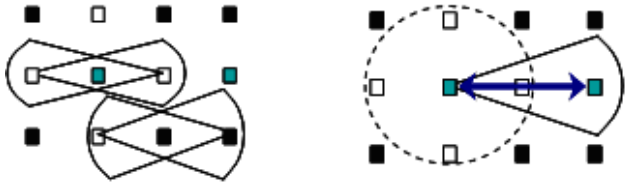


図 8：パッチアンテナ



（a）　　（b）

図 9：指向性アンテナによる(a)空間利用効率の向上と(b)通信距離拡張

4.2 センサノードとの通信および通信状況監視

センサネットワーク等でよく使われている ZigBee を利用したセンサノードとの通信を行うことで，USRP2 をセンシングデータの収集を行う基地局やクラスタヘッド，ネットワーク上のトラフィックを監視するパケットスニファシステムとして利用する．[4]では図 10 に示す Mica mote を利用したセンサネットワークに，図 11 に示すスマートアンテナを持つ UNAGI を利用してセンサネットワークを階層化し，ネットワークの長寿命化を図る研究が行われている[4].

図１０：Mica mote

図 １１：UNAGI

4.3 複数ネットワークを結合するための周波数ブリッジング

USRP2 を利用することで，コグニティブ無線のように周波数や方式が異なる周波数帯で構成されているネットワーク間の結合が可能となる．図 1 のドーターボードを利用した場合，例えば 2.4GHz で受信し 5GHz で送信することが可能である．またその逆として 5GHz で受信し 2.4GHz で送信することも可能である．周波数切り替えによる複数ネットワークの結合について図１２に示す．

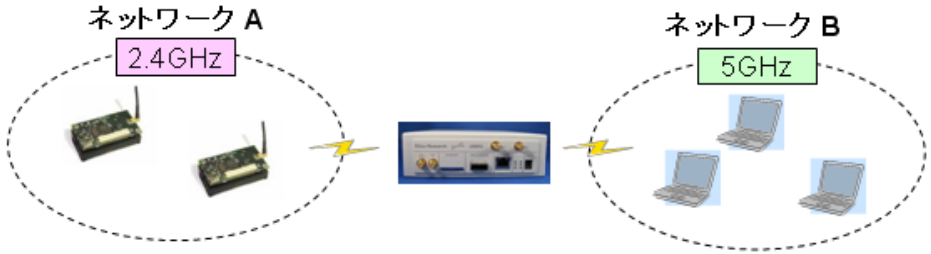


図１２：周波数ブリッジング

4.4 パケットリカバリー

伝送中にパケットが破損した場合，受信したパケットをただ破棄するのではなく，複数の破損したパケットを組み合わせることで，破損部分を修復してパケットを復元する．これによってネットワーク全体のスループットの向上が図れる．[8]のパーシャルパケットリカバリー(Partial Packet Recovery)では，部分的なエラー修復を目的とし，Postamble と Soft Value を使ってパケットの破損部分を正確に検出し，破損部分のみを ARQ パケットによって再送する技術が研究されている．

5. まとめ

ソフトウェア無線プラットフォームのソフトウェア GNU Radio とハードウェア USRP2 を利用した無線通信テストベットを構築した．そして，テストベッドの利用法を考案し，デモを実現する．今後は，構築したテストベッドを利用して様々な MAC プロトコルやネットワークプロトコルを提案・実装し，実環境での評価を進める．

現在、東京大学森川博之研究室の猿渡俊介助教と我々で GNU Radio と USRP についての wiki を立ち上げ，情報の共有を行っている．URL は謝辞に記載．また，[9]で USRP と GNU Radio が報告されている．

謝辞

本研究で使用している GNU Radio と USRP について東京大学森川博之研究室の猿渡俊介助教，金昊俊氏に助言を頂いた．また，本研究は科研費基盤研究 A(20240005)の助成を受けておこなった．ここに記して感謝を申し上げる．

GNU Radio と USRP についての wiki：http://www.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/~saru/usrp/

参考文献

[1] Crossbow：http://www.xbow.jp/motemica.html
[2] 永原崇範，鹿島拓也，猿渡俊介，川原圭博，南正輝，森川博之，青山友紀，篠田庄司，“ユビキタス環境に向けたセンサネットワークアプリケーション構築支援のための開発用モジュール *U*3 (U-cube) の設計と実装,” 信学技報，情報ネットワーク(IN)，Mar. 2003.
[3] N. Kohmura, H. Mitsuhashi, M. Watanabe, M. Bandai, S. Obana, and T. Watanabe, "UNAGI: A Protocol Testbed with Practical Smart Antennas for Ad Hoc Networks,", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 12, Issue 1, pp. 59-61, Jan. 2008.
[4] 坂本浩，萬代 雅希，渡辺 尚，” 空間多重効果を利用した階層型センサネットワークの考察と実環境での評価”, 情報処理学会（MBL 研究会), 2008-MBL-47 pp. 61-68, 2008 年 11 月.
[5] 河村直哉，高田昌忠，萬代雅希，渡辺尚, "指向性 MAC プロトコルの Deafness に関する実験について," 情報処理学会研究会報告，モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 2007-MBL-40, pp. 61-68, 2007 年 2 月.
[6] GNU Radio：http://gnuradio.org/trac
[7] USRP2：http://gnuradio.org/trac/wiki/USRP2
[8] K. Jamieson, and H. Barakrishnan, “PPR: Partial Packet Recovery for Wireless Networks,” SIGCOMM 2007.
[9] 猿渡俊介,” [招待講演] Gnu Radio/USRP を用いた研究事例と今後の展開”，情報処理学会(MBL 研究会),2009-MBL-49, 2009 年 5 月.