# 無線システムエミュレータの実装と評価

# 真野 浩<sup>1,a</sup>) 猿渡 俊介<sup>2</sup>

#### 受付日 2013年9月13日, 採録日 2014年2月14日

概要:電波利用の急速な拡大により,電波資源の利用効率の改善,共用技術の確立が重要な課題となって いる.ここで利用効率の改善では,無線網だけでなく有線網により接続される複数の構成要素からなる複 雑なシステムが構成されている.また,共用技術では,同一の周波数資源を複数の異なる無線システムが 空間軸,時間軸,周波数軸で多元的に共同利用する試みが進められている.これらの無線システムを評価 するためには,現実に近い複雑性・即時性を備えていること,再現性があること,スケーラビリティがあ ることを満たしたテストベッドが必要である.本論文では,実電波を輻射することなく,多数の異方式無 線通信システムが混在,または連携する複雑な運用環境におけるシステム評価を可能とする無線システム エミュレータを提案する.提案システムを実装して評価した結果として,再現性,スケーラビリティを損 なうことなく,異なる周波数や異なる方式の混在する複雑な無線システムの評価を実時間で実現できるこ とを示す.

キーワード:無線システム,評価環境,エミュレータ,仮想化, FPGA

# Implementation and Evaluation of a Wireless System Emulator

HIROSHI MANO<sup>1,a)</sup> Shunsuke Saruwatari<sup>2</sup>

Received: September 13, 2013, Accepted: February 14, 2014

**Abstract:** The rapid expansion of wireless use induces two technical challenges: improving the efficiency of radio resource usage and sharing spectrum resources with multiple wireless systems. The efficiency improvement of radio resource usage needs a complex systems design incorporating multiple components over wired and wireless networks. Toward the spectrum resources sharing we have to evaluate and tackle the complex interference on space domain, time domain, and spectrum domain over different wireless systems. To evaluate these forthcoming complex wireless systems, we need new evaluation test-bed which satisfies four requirements: complexity, immediacy, repeatability, and scalability. To this end, this paper proposes a wireless system emulator which can be used over complex interference environments with outer complex network systems in the real time without actual radio radiation. Its implementation and evaluation show that the wireless system emulator emulates complex interference of different systems and different frequency channels.

Keywords: wireless systems, evaluation tools, emulator, virtualizatoin, FPGA

# 1. はじめに

20世紀初頭,電波の割当ては情報通信技術が未発達の時

<sup>a)</sup> hiroshi@manosan.org

代に干渉を避けるという目的で始まった.当時の電波は用 途ごとに閉じられた形態であり,1つの周波数帯には1つ のシステムが割り当てられていた.時代は進み,今や携帯 電話,無線LAN,センサネットワークなどによって電波利 用が急速に拡大して我々は新しいサービスを享受できるよ うになった.電波を利用したトラヒックは今後も増加し続 けていくと考えられる.しかしながら,電波は有限である ため,電波利用効率の改善,周波数共用技術の確立が重要 な課題となっている.

山梨大学大学院医学工学総合教育部 Graduate School of Medical and Engineering Science Department of Education, Yamanashi University, Kofu, Yamanashi 400-8510, Japan

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 静岡大学大学院情報学研究科 Graduate School of Informatics, Shizuoka University, Hamamatsu, Shizuoka 432–8011, Japan

これらの課題に対応することを目的として,無線システムは,これまでのような用途別に閉じた単純な形態ではなく,複数の要素によってシステムが構成される複雑な形態へと変化し始めている.たとえば,コグニティブ無線では,同一の周波数資源を複数の異なる無線システムが空間軸,時間軸,周波数軸で多元的に共同利用する試みが進められている [1].現在標準化が進められている TV ホワイトスペースを利用する IEEE 802.11af では,無線局がネットワーク接続されたデータベースを参照することで,動的に利用可能な周波数帯域を選択する.また,フェムトセルでは,複数の基地局どうしが連携しながら,子局の衝突を制御することで周波数資源のマッピングを最適化している [2].

このように複雑化する無線システムでは、システムをど のような手段によって検証・評価するかが問題となる.将 来的には、無線システムは、同一のシステム内で生じる複 雑さやシステム間で生じる複雑さにより、無数の形態が発 生しうる.これまでのように高度に抽象化したシミュレー ションでシステムを検証する場合では、発生しうる現象を 網羅するモデル化のコストが肥大化していくと予想され る.一方で、モデル化を避けてシステム評価にフィールド 試験を多用することは、再現性のなさや既存システムに与 える影響などを考えると現実的ではない.

これからの無線システムを評価するためには、現実に近 い複雑性・即時性を備えていること,再現性があること, スケーラビリティがあることを満たしたテストベッドが 必要である.このような観点から、本論文では、現在のデ ジタル変調を用いた無線機がデジタル I/Q データをイン タフェースに持つことに着目し, デジタル I/Q データを FPGA でリアルタイムに直接干渉させる無線システムエ ミュレータを提案する.具体的には、仮想マシンを基軸と した無線ノード抽象化層と、ソフトウェア無線を基軸とし た無線通信抽象化層とを組み合わせることで、スケーラブ ルな検証環境を実現する. 無線システムエミュレータによ れば、実電波を輻射することなく、多数の異なる周波数・ 異なる方式の無線通信システムが混在または連携する複 雑な運用環境でのシステム評価が可能となる.実装では, NICT が運営する StarBED [3] の有線系テストベッドと接 続して外部ネットワークと相互に連携可能な有・無線統合 テストベッド環境を構築した.基本性能を評価することを 目的として, IEEE 802.11 で動作する無線ノードを無線シ ステムエミュレータ上に実装した. 異なる周波数, 異なる 変調方式の電波干渉を, 商用無線 LAN 装置を用いて実験 した結果と比較して, 無線システムエミュレータ上で現実 の無線環境で生じる現象が再現できることが確認された.

本論文の構成は以下のとおりである.まず,2章において,無線システムの評価に求められる要件と関連研究の課題を示す.3章では2章に示した要件を満たす提案手法に

ついて述べる.4章では,提案手法の実装と評価を示し, 提案手法の有効性を明らかにする.4章の実装と評価を受 け,5章ではスケーラビリティに関する議論,CPU・GPU 処理との比較に関する議論,電波の表現能力に関する議論, フェーディングエミュレータとの比較に関する議論につい て述べる.最後に6章でまとめとする.

# 2. 無線システムの評価手法

## 2.1 要件

本論文では、多数の異方式無線通信システムが混在、ま たは連携する複雑な運用環境におけるシステム評価を、特 定の無線技術に限定せず、繰り返し利用可能な汎用的テス トベッドとして提供することを目的とする.これに向けて は、現実に近い複雑性・即時性を備えていること、再現性 があること、スケーラビリティがあることの3つが求めら れる.

現実に近い複雑性・即時性は、電波の挙動を現実の環境 に可能な限り近い状態で検証するために必要となる.利用 効率の改善のために、現在の無線通信は、無線網だけでな く有線網により接続される複数の構成要素からなる複雑な システムによって構成されている.たとえば、フェムトセ ル[2]では、複数の基地局をネットワークで接続して、送 受信を計画的にスケジューリングしたり、認証情報や接続 管理を連携してシームレスなハンドオーバを実現したりし ている.フェムトセルに限らず、MU-MIMO[4]、コグニ ティブ無線[1]、ヘテロジニアスネットワーク[5]や、今後 登場しうる新たな無線システムの開発では、無線局だけで なく、複数の要素の連携により構成される複雑性を持つシ ステム全体での評価が必要となる.

さらに、同一の電波資源を複数の異なる無線システムで 共用利用する場合、電波は、周波数、時間、空間において 互いに複雑に干渉する. 複数の異なる無線システムが共存 する環境では、単純に連続波の一様な干渉に限らず、周波 数、時間、空間において、その干渉度合いが離散的かつ動 的に変化する複雑な干渉評価が必要となる.

再現性とは、実際の電波と同等の現象を繰り返し再現で きることを意味する.開発効率を向上させるためには、設 計・実装・評価・展開の各フェーズでできるだけ多くの開 発資源を共通で利用できることが望ましい.実際に展開す るサービスに近い複雑な環境を再現して検証することがで きれば、各機能の再利用性が高まり、結果として開発効率 が向上する.また、通常の研究開発では設計・実装・評価 は1度ですむものではなく、実装の段階で生じた問題や評 価した結果を基に設計をやり直すといったことが多発す る.問題が生じてやり直しする際に問題が解決できたかど うかを迅速に評価するためにも、問題が生じた環境を再現 できる機能は必須である.

スケーラビリティとは, できるだけ多くの端末で評価可

能であることを意味する. テレビ,携帯電話,電子フォト フレーム,デジカメ,スマートメータなど身の回りのあり とあらゆるモノが無線通信するようになりつつある現在, 無線通信システムは多数の異なるシステムが複雑に影響を 与え合う方向に向かっている. 無線接続される端末の数は 今後も増大し続けることが予想されるため,多くの端末で 評価可能であるスケーラビリティが必要となる.

本研究では、スケーラビリティとして、即時性を備えた まま数百台規模での検証ができる評価システムの構築を 目指す.数百台の規模の根拠は、今後の無線通信の性能向 上に関係する.現在の無線通信では、通信範囲を狭くして 電波の再利用性を高めつつ高速化を目指す傾向にある.今 後狭くなる通信範囲において、相互に干渉する空間(隣接 チャネル干渉を含む)内に存在するノード数は数百台規模 であると考えられる.すでに、LTE、IEEE 802 などにお ける次世代無線通信の標準化の議論では、マイクロセル化 が進んでいる.電波干渉の範囲外に存在するノードに関し ては、各ノード間の下位層での相互作用が発生しないため、 上位層のみの接続で検証ができる.

## 2.2 関連研究

現在のところ,2.1 節に示した現実に近い複雑性・即時性 を備えていること,再現性があること,スケーラビリティ があることの3つを同時に備えたシステムは存在しない.

現実に近い複雑性・即時性を備えている評価手法として フィールド試験があげられる.フィールド試験とは,評価 の対象となる実システムを構築,稼動し,任意の環境にお いて実稼動評価する手法である.フィールド試験は実施コ ストが大きいものの,最終的なシステムの評価としては不 可欠なものである.

フィールド試験の実施コストを下げることを目的とし て,YRP Wireless IOT サービス [6] では,GSM/GSRP, W-CDMA,TD-SCDMA,TD-LTE などをあらかじめ用意 している.また,GENI [7] では IEEE 802.16e,ORBIT [8]・ NITOS [9]・Emulab [10] では IEEE 802.11 といったよう に,免許取得要件が緩和されている特定の無線方式を室内 環境で用いたフィールド試験システムも存在する.しかし ながら,フィールド試験では,実施コストが下がったとし ても,試験実施環境の電波伝播や,外乱(周囲の車の動き, 大気の状態,他のシステムからの干渉波)が環境固有であ り,多様性や再現性に欠けるという問題がある.また,既 存の許認可されたシステムの評価ではなく,新たに提案さ れるシステムを評価するには,実験環境や法令規制などを システムごとに調整することが必要となる.

再現性が高く,かつスケーラビリティのある評価システ ムとして,計算機シミュレータがあげられる.計算機シ ミュレータでは,計算コストを下げるために無線通信を高 度に抽象化している.たとえば,まず,無線システムの持 つ変調方式(BPSK, QPSK など)に対し、これに干渉す るノイズや非希望波を仮定して、干渉によって生じる BER (Bit Error Rate)特性や SINR (Signal Interference Noise Ratio)特性をモデル化する.次に、各ノードの相対的な位 置情報,送信電力,空中線利得,伝搬損失,周波数などか ら各ノードにおいて受信しうる希望波および非希望波の電 力を各々算出する.このとき、伝搬路に存在する反射物や 移動にともなうフェーディングによって希望波が複数の経 路から到達する場合に、複数経路をモデル化したチャネル モデルによって希望信号の振幅,位相,時間の各変動を算 出する.最後に、算出した希望信号と非希望信号の比率を 基に、あらかじめモデル化した BER 特性や SINR 特性を 参照して送信パケットに含まれるエラー量を求め、パケッ トの到達性を判定・評価している.乱数のシードを固定と すれば、毎回まったく同じ結果を得ることも可能である.

このような抽象化を行うことで、無線通信の計算コス トを下げることができるため、計算機シミュレータでは 多くの端末で再現性の高い検証を実施することができる. これまでにも、QualNet [11], EXata [12], ns-3 [13], OM-NeT++ [14], IP モビリティ実験のための無線環境エミュ レータ [15], 高速移動体向けの分散型モバイルネットワー クエミュレータ [16] など、数多くの計算機シミュレータが 利用されてきた.

しかしながら、計算機シミュレータでは、高度な抽象化を 行っているがゆえに現実に近い複雑性を持っていない.例 として, 複数の異なる無線システムが同一の周波数帯を共 有している場合を考える.電波の干渉は、同じ電力であっ ても変調方式、通信帯域幅、スペクトラムマスクによって 希望波に与える影響が異なる.たとえば、広帯域の OFDM を受信している無線ノードが、同じく広帯域の OFDM の 干渉を受けた場合と,狭帯域信号の干渉を受けた場合で は、干渉電力が同じでも通信特性に与える影響は異なる. また,現在の多くの無線システムはパケット通信により, 離散的な時間で通信を行うが、干渉がパケット全体に一様 に生じる場合と、部分的に生じる場合では、干渉の度合い やパケットの構成要素などによって影響が異なる.抽象化 レベルを下げて、より現実に近い複雑性を実現することは できるものの、計算コストが高くなるので即時性やスケー ラビリティが失われてしまう.

現実に近い複雑性・即時性を備えており,かつ再現性のあ る評価手法として,CMUテストベッド[17],IEEE 802.11 向けのワイヤレスネットワークエミュレータ[18],IEEE 802.16 向けのハードウェアリンクレベルエミュレータ[19] などの電波伝搬エミュレータがあげられる.電波伝播エ ミュレータでは,まず,送信元の無線ノードから受け取っ た高周波のアナログ信号を混合器によって中間周波数に落 とす.次に中間周波数の信号をAD変換器によってデジタ ル信号に変換する.得られたデジタル信号に対して信号処 理によって伝播変動や干渉信号を直接的に与えたあと,DA 変換器と混合器を通して高周波のアナログ信号に戻して宛 先無線ノードへと入力する.このような特徴を持っている ため,電波伝搬エミュレータでは,実機をそのまま接続す ることができる.しかしながら,評価システムへの入出力 が高周波信号を前提としていることから,無線方式,周波 数帯域が特定の方式に限定されるうえに高コストになり, スケーラビリティが欠けるという問題がある.すなわち, 評価システムとしては特定の無線システムの評価に特化す ることとなり,汎用性に欠ける.

# 3. 提案システム:無線システムエミュレータ

2章で述べたように、多数の異方式無線通信システムが 混在、または連携する複雑な運用環境における無線システ ムを検証・評価するためには、

- 現実に近い複雑性・即時性を備えていること
- 再現性があること
- スケーラビリティがあること

の3つが求められる.本章では、これら3つの要件を満た すために、半導体技術の進化によって飛躍的に性能が向上 している FPGA を用いることで複雑な信号干渉をリアル タイムに再現できるようになった点に着目する.現在のデ ジタル変調を用いた無線機がデジタル I/Q データをイン タフェースに持つことを利用して、デジタル I/Q データを FPGA を用いてリアルタイムで直接干渉させる無線システ ムエミュレータを提案する.無線システムエミュレータで は、仮想マシンを基軸とした無線ノード抽象化層と,ソフ トウェア無線を基軸とした無線通信抽象化層とを組み合わ せることで,スケーラブルな検証環境を実現する.提案す る無線システムエミュレータは特定の無線技術に限定され ておらず,様々な無線システムに対して繰り返し利用する ことができる.

# 3.1 システム構成

図1に提案手法のシステム構成を示す.二重線の四角が 無線ノードエミュレータを,破線の角丸四角が空間エミュ レータを,左側の縦長の四角がシナリオ生成機構を表し ている.図2にシステム全体における各要素間の関係を 示す.提案システムは,無線ノードエミュレータ,空間エ ミュレータ,シナリオ生成機構から構成される.無線ノー ドエミュレータは,無線システム内においてIEEE 802.11 の基地局・子局,テレビ放送局,LTE基地局・子局などの 様々な方式の無線ノードを作成する.各無線ノードは空間 エミュレータに接続される.空間エミュレータは,無線シ ステム内において市街地における 2.4 GHz 帯,市街地にお ける TV ホワイトスペース,室内の 2.4 GHz 帯などの電波 伝搬環境を構築する.

無線ノードエミュレータや空間エミュレータにおいてど



図 1 システム全体像 Fig. 1 System overview.



図 2 システム構成図





Fig. 3 Wireless node emulator.

のような無線ノード,電波伝搬環境を構築するかを設定す るのがシナリオ生成機構である.シナリオ生成機構は,こ れら電波伝搬環境や無線ノードの電力,空中線利得などの 条件,無線ノードの相対的な位置や方向を時系列的に記載 することで移動体通信の評価シナリオを生成する.生成し た評価シナリオに基づいて,IPを介して,無線ノードエ ミュレータ,空間エミュレータ,外部システムに対して必 要な設定を行う.

提案システムは、モバイル IP のための Home Agent や TV ホワイトスペースデータベースなどを利用するために、 外部システムと、基地局などの役割を担う無線ノードとを IP などを介して接続する.実際に、無線システムエミュ レータはネットワーク実験環境である StarBED 内に構築 されているため、JGN やインターネットを介して外部シス テムと連携した評価・運用も可能である.

## 3.2 無線ノードエミュレータ

無線ノードエミュレータは、無線システムエミュレータ 内において無線ノードを構築する機能を担う.図3に無 線ノードエミュレータの全体像を示す.無線ノードエミュ レータは、無線ノード抽象化層と無線通信抽象化層の2つ から構成される. 無線ノードエミュレータでは,「スケー ラビリティがあること」を実現するために, 簡単に新しい 無線ノードを追加できるための仕組みを提供している. ま た,「現実に近い複雑性・即時性があること」「再現性があ ること」を実現するために, デジタル I/Q データのままで フロントエンド部分を FPGA による計算処理によってエ ミュレーションする仕組みを実現した.

まず,無線ノード抽象化層において多数の無線ノードの ソフトウェアを実機に近い形で実現する仕組みを提供する. 無線ノード抽象化層は汎用 PC を用いて実現されており, ホスト OS 上で仮想マシンによって複数のノードが動作し ている.仮想マシン上ではゲスト OS が実行されており, 実機で用いるアプリケーションをそのまま動作させること ができる.このような仮想マシンを用いたノードの仮想化 により、多数の実機を模した評価を簡単に実行できる.た とえばゲスト OS として Android OS を用いることで、実 際のスマートフォンアプリケーションを用いた評価を実施 することもできる. 各ゲスト OS はそれぞれ独立した無線 インタフェースを操作してパケットを送受信する.ホスト OS では、MAC 上位層が実装されている。MAC 上位層と は、MACアドレスの管理や QoS 管理など MAC 層の中で もリアルタイム性の要求の低い機能をソフトウェアにより 実装した層であり、デバイスドライバとして与えられてい る. これら MAC 上位層では、仮想マシンから受け取った パケットを PCI Express を介して無線通信抽象化層に送信 する.

無線通信抽象化層は無線ノードの通信を物理層レベルで 空間エミュレータに接続するための仕組みを提供する.本 提案システムの特徴の1つが,無線ノードと空間エミュ レータのインタフェースと空間エミュレータで扱うデータ 形式をデジタル I/Q データに統一したことである.デジタ ル I/Q データとは,Iが信号の同相成分,Qが直交成分を 表しており,位相と振幅の制御がしやすい形式となってい る.デジタル I/Q データは現在の多くのデジタル無線機で 用いられており,フロントエンドのみを AD 変換器・DA 変換器・ヘテロダイン回路・アンプ回路などのアナログ回 路を具備したものに交換すれば実際の電波を送受信する無 線通信機として用いることができる.

無線通信抽象化層では、FPGA を用いて、MAC 下位層、 物理層、フロントエンドが実現されている。MAC 下位層で は、パケットの衝突制御などのクリティカルなリアルタイ ム処理を要する機能を FPGA および FPGA 上の CPU コ アによって実現する。物理層では、FPGA 上の回路として 実装されたデジタル変復調によって QPSK などの1 次変復 調、OFDM などの2 次変復調を行ってデジタル I/Q デー タを生成する。フロントエンドでは、デジタル I/Q データ に対して周波数チャネルオフセットを与えたり、回路ノイ ズやアンプの非線形性による影響などの実際の無線機で発 生する信号のひずみを疑似的に与える.このようにして生成されたデジタル I/Q データは空間エミュレータに対して入力される.

本提案システムの特徴であるデジタル I/Q データに統 ーすることによるメリットの1つが無線ノードエミュレー タのフロントエンドの簡素化である.フェージングシミュ レータなどに接続される実機の無線機では,デジタル I/Q データを DA 変換してアナログ信号を生成して,ヘテロダ イン回路,パワーアンプ,バンドパスフィルタなどのアナ ログ回路に入力する.フェージングエミュレータはこれら のアナログ回路によって生成された高周波信号を再びヘテ ロダイン回路に入力して AD 変換でデジタル I/Q データを 生成する.高速に動作する AD 変換器は高価であるため, フェージングエミュレータでは,これらのアナログ処理部 分が経済的コストを増加させたりシステム性能のボトル ネックとなったりする要因となる.

そこで無線システムエミュレータでは, 無線ノードエ ミュレータと空間エミュレータが密結合することでフェー ジングエミュレータを用いた際に必要であったアナログ回 路部分を取り除く. 無線ノードエミュレータのフロントエ ンドでは、すべてをデジタル I/Q データのまま単純な乗 算回路と加算回路で実際の無線機で発生する現象を再現す る.図4に無線ノードエミュレータのフロントエンドの 送信部の詳細を示す.フロントエンドでは、まず、ヘテロ ダイン部においてデジタル I/Q データに対して疑似ヘテ ロダイン回路によって周波数チャネルオフセットが与えら れる.疑似ヘテロダイン回路では,疑似ノイズが加算可能 な NCO (Numeric Control Oscilator) を具備することで, 位相ノイズ, I/Q オフバランス, 内部 NF (Noise Figure) などの無線機の特性を模倣する.次に,パワーアンプ部に おいてアンプの非線形性が再現される.具体的には、アン プの特性をルックアップテーブル (LUT) として用意して おき,入力されたデジタル I/Q データに応じてルックアッ プテーブルから非線形のひずみが加えられる. 最後に, デ ジタルバンドパスフィルタ部においてアナログのチャネル





フィルタを模倣し,隣接チャネルに対するスペクトラムマ スクなどを模倣する.フロントエンドの受信部では,同様 の処理を逆順に行う.

## 3.3 空間エミュレータ

空間エミュレータは、各無線ノードが送信する電波の干 渉をエミュレートするための仕組みである.「現実に近い 複雑性・即時性があること」「再現性があること」を実現 するために、無線ノードエミュレータから受け取ったデジ タル I/Q データをそのまま FPGA による計算処理によっ て干渉させる.また、干渉の計算を同じ回路を並列に並べ るだけで接続する無線ノード数を増やせるようにすること で、「スケーラビリティがあること」も実現している.

図 5 に空間エミュレータの内部接続図を示す. ノード<sub>i,tx</sub> はノードiの送信ポート,ノード<sub>i,rx</sub> はノードiの受信ポート,伝搬路<sub>i,j</sub> はノードiからノードjへの伝搬路を意味しており,図 5 ではノード数は4台と仮定している.無線ノードiから入力されたデジタル I/Q データは自分以外の無線ノードjとの間の伝搬路<sub>i,j</sub> に入力される. 伝搬路<sub>i,j</sub> では,シナリオジェネレータからあらかじめ算出された減衰,遅延,位相などの各変動量がパラメータとして与えられている. 各伝搬路では,入力と与えられたパラメータに基づいて減衰や遅延がエミュレートされる. 最後に,宛先無線ノードにおいて各無線ノードから送られてきた信号を加算することで受信信号を再現する.

図 6 に伝搬路の内部構成を示す.各伝搬路は,直接波 およびマルチパスを再現するための複数の伝搬路から構成 される.まず,伝搬路に入力された入力信号 s に対して伝 搬路の距離から求められる伝搬遅延 d<sub>0</sub> だけ遅延を与える. 次に,伝搬損失 L<sub>0</sub> が乗算される.伝搬損失 L<sub>0</sub> は,2 波モ デルや秦モデルなどと,各種障害物などの通過損失,無線 ノードに利用するアンテナ特性および相対的な位置,周波 数によってあらかじめ算出したものがシナリオ生成機構か



図 5 空間エミュレータ Fig. 5 Air emulator.



図 6 伝搬路の内部構成 Fig. 6 Internal structure of a propagation path.

ら与えられる.その後,フェーディングや反射物による位 相変化ω<sub>0</sub>を乗ずることで,位相方向での変動を与える.

マルチパスの再現は、同一の入力信号 s に対して、独立 した遅延、損失、位相変動を与えた結果を、すべてのパス を加算することにより実現する. 図 6 では、m 個のマルチ パスが構成されており、 $d_i$ 、 $L_i$ 、 $\omega_i$ は、それぞれ i 番目の マルチパス経路を意味している. これらの各マルチパスの 信号を個々の時刻に対して、損失  $L_i$ のみを変化させるこ とでフラットフェーデイングを、損失  $L_i$ および位相 $\omega_i$ を 変化させることによって周波数選択性フェーディングを模 倣する.

ドップラーシフトも同様の仕組みで再現できる. ドップ ラーシフトは、マルチパスの各経路に対して、遅延、損失、 ドップラースペクトラムで表現される. そのドップラース ペクトラムに相当するのが図 6 のうち, wn で与えられる信 号成分となる. たとえば, IMT-2000のITU-R M.1225 [20] では、室内オフィス (indoor office), 屋外から室内・歩行者 (outdoor to indoor and pedestrian), 車 (vehicular) など について,遅延プロファイルとして6段のパスを用いてチャ ネルを表現することが推奨されている. IEEE 802.16mの 標準化文書 IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD) [21] や Wireless LAN の IEEE 802.11n の 標準化で議論された TGn Channel Model [22] などでは、 オプションとして、 さらなるタップ数を追加することが検 討されている.提案手法においては、図6に示したよう に並列処理しているため, タップ数の増加は演算処理時間 に影響を与えない. タップ数の増加により, FPGA の消費 ロジック数が増えることも考えられる.今回の実装では, 利用事例として移動体通信の標準として広く普及している IMT-2000のITU-R M.1225 [20] を想定して7タップとし ている. 現段階の7タップにおける消費ロジック数は4章 に記載するように十分に余裕があり,必要に応じてタップ 数を増加させることも可能である.



図 7 FPGA ボード Fig. 7 FPGA board.

## 3.4 シナリオ生成機構

提案システムにおけるシナリオ生成機構は、エミュレートする無線ノードの電力、周波数、空中線利得、相対位置関係から、空間エミュレータにおける各伝搬路の伝搬遅延 $d_i$ 、伝搬損失  $L_i$ 、位相変動 $\omega_i$ を決定する仕組みである.具体的には、システムシミュレーションソフトウェアであるScenargie [23]が提供する電波伝播、チャネルモデル、アンテナモデルなどの商用レベルに普及している各種プロファイルを利用する.Scenargie を用いることで、地図情報に基づいたシナリオの生成などを簡単に利用することができる.シナリオ生成機構では、Scenargie が出力した各伝搬路の伝搬遅延 $d_i$ 、伝搬損失  $L_i$ 、位相変動 $\omega_i$ を空間エミュレータに対して HTTP を介して逐次与える.

また,提案システムによって,任意の無線システムの干 渉特性を測定し,これを PER (Packet Error Rate)モデ ルとして,シミュレータ上で再現利用することが可能とな る.さらに,無線ノードをあらかじめ用意された出力を送 出するように設定することで,電子レンジなどの任意のノ イズを,任意の時間,任意の位置関係で発生させることも できる.これは,任意の自然環境で計測した環境ノイズの 再現にも利用できる.加えて,任意の無線ノードをシナリ オにより任意の空間位置に配置し,その無線ノードの入力 信号を記録保存することで,空間中の任意の地点における 受信スペクトラムを再現することもできる.

## 4. 実装と評価

3章に示した無線ノードエミュレータおよび空間エミュ レータを Xilinx 社の FPGA である XC7K325T [24] を用い て FPGA ボードとして実装した. 図 7 に実装した FPGA ボードの写真を示す.本実装では,経済性の観点から,無 線ノードエミュレータにおける無線通信抽象化層と空間エ ミュレータに同じ FPGA ボードを用いた.各 FPGA ボー ドは,10 Gbps の高速シリアル通信が可能な SFP+ポート を 4 つ,10 Gbps の高速シリアル通信が可能な miniSAS ポート 3 つを具備している.



本実装では、SFP+や miniSAS などのポートを用いて無 線ノードエミュレータを最大 16 台まで接続することがで きる. 図 8 に 16 台の無線ノードエミュレータを接続する 例を示す. 16 台の無線ノードエミュレータを接続する場合 には、PCI-E カードスロットを 4 つ具備した PC の場合、 4 筐体で収納可能となる. 各筐体に対してそれぞれの無線 ノードエミュレータノードから 1 本の SFP+で接続され る. それぞれの PC 内の空間エミュレータは miniSAS で フルメッシュに接続される.

無線ノードエミュレータにおける無線通信抽象化では、
IEEE 802.11a/b/gに対応した MAC 層と物理層、これらを
制御する Microblaze CPU と NORTi OS を実装した. その結果、ルックアップテーブル (LUT)の使用数が 119,835
個、フリップフロップ (FF)の使用数が 101,677 個、ブロック RAM の使用数が 166 個、ファームウェアのサイズは 199 KB であった.

空間エミュレータの実装では、各伝搬路のマルチパスの数 を7とした場合、ルックアップテーブル(LUT)の使用数が 940 個、フリップフロップの使用数が2,424 個、DSP(Digital Signal Processor)の使用数が31 個、ブロック RAM の使用数が14 個であった.本実装で用いた XC7K325T は ルックアップテーブルを203,800 個、フリップフロップを 407,600 個、ブロック RAM を 890 個、DSP を 840 個具備 しているため、1 枚の FPGA ボードでは4 ノード間の伝搬 路である12 伝搬路(各々7マルチパスを含む)の収納が 可能である.すなわち、16 ノード間の伝送路である240 伝 送路の場合でも、FPGA ボードを16 枚用意して、PCI-E カードスロットを4つ具備した PC の場合、4 筐体で収納 可能となる.

# 4.1 遅延の評価

2章で述べたように、本提案システムでは現実に近い即時 性が求められる.このような観点から、各無線ノード間の





入出力の遅延を計測した.具体的には,送信元の無線ノー ドエミュレータのフロントエンドから送信されたパケット が空間エミュレータを経由して宛先の無線ノードエミュ レータのフロントエンドまで届くまでの時間を FPGA の 設計ツールおよびロジックアナライザにより確認した.信 号幅を 33 bit,帯域幅を 200 MHz として動作させた状態で 計測した結果,入出力間の遅延は 352 クロック,すなわち 1.76 µ秒であった.この結果は,一般的な無線システムで発 生する信号処理遅延時間と比較すると十分に短い.たとえ ば, IEEE 802.11 が想定する信号処理遅延は 2µ秒である.

#### 4.2 異なる種類の非希望波に対する影響に関する評価

2章で述べたように、本提案システムでは現実に近い環 境で無線通信をエミュレートするだけでなく、実機の電波 の特性を再現できることを目指している.このような観点 から、非希望波が希望波のスループットに与える影響を本 提案システムで再現できるかどうかの検証を行った.具体 的には、中心周波数が 2,442 MHz において 6 Mbps で通信 している OFDM の希望波に対して、2 種類の異なる非希 望波を与えてスループットの減少を観察した.非希望波 は主通信と同じ 6 Mbps の OFDM と、狭帯域信号(CW: Continuous Wave)の2 種類を比較した.それぞれの妨害 波の中心周波数を 2,412 MHz から 2,472 MHz まで変化さ せた.

図9に実機での評価環境を示す.802.11gで動作するア クセスポイントとノードとを混合分配器と同軸ケーブルで 接続し,混合分配器を介して非希望波を入力した.スルー プットの計測は無線システムエミュレータと実機評価の両 方ともに iPerf で行った.

図 10 に、希望波のスループットが 10%以上劣化した際 の希望波の送信電力と非希望波の送信電力の比を示す. 横 軸が非希望波の中心周波数,縦軸が希望波によるスルー プットが 10%以上劣化した際の希望波の送信電力と非希望 波の送信電力との比である. たとえば,横軸が 2,412 MHz で、縦軸が –18 dB の点は、中心周波数が 2,412 MHz の非 希望波を、電力を増やしながら希望波に与えた場合に非希 望波のスループットが 10%劣化したときの希望波と非希望 波の送信電力の比が –18 dB であることを意味している. 図 10 より次の 3 つのことが分かる.

1つ目は、非希望波が OFDM の場合では、非希望波の





Fig. 10 Experimental results: Interference from a different system.

中心周波数が希望波の中心周波数である 2,442 MHz に近づ くに従って,通信性能を維持するのに要する希望波と非希 望波の電力比が大きくなることである.これは,希望波と 非希望波の中心周波数が近くなることで,干渉の度合いが 大きくなるためであると考えられる.

2つ目は、非希望波が狭帯域信号の場合では、希望波と 非希望波の中心周波数が一致する場合よりも非希望波が 2,437 MHz か 2,447 MHz のときの方が通信性能を維持する のに要する希望波と非希望波の信号電力の比が大きくなっ ていることである.これは希望波で用いられている OFDM の中心周波数である 2,442 MHz はサブキャリアの狭間であ る Null 点となり、非希望波が狭帯域の場合には干渉の影 響を受けにくいからだと考えられる.

3 つ目は、非希望波が OFDM の場合でも狭帯域信号の 場合でも、実環境での評価結果と本提案システムを用いた 評価結果で同じ特性が出ていることである.通常のネット ワークシミュレータの多くでは、非希望波の種類によらず、 希望波の信号電力と非希望波の信号電力の比である SINR のみを用いて通信性能を決定している.また、多くのネッ トワークシミュレータでは本実験で行ったような異なる周 波数、異なる方式の干渉評価を実装していない.これらの ネットワークシミュレータと比較すると、本提案システム は実環境に近い特性を実現できているといえる.

## 4.3 同種のシステムから受ける影響の評価

4.2 節では,提案システムが異なる種類の無線システム からの非希望波の影響を再現できていることを示した.そ れに対して本節では,同種のシステムから受ける影響に関 して実機,提案システム,シミュレータを比較した結果を 示す.具体的には,IEEE 802.11gにおいて1組の通信チャ ネルを7チャネルに固定し,もう1組の通信チャネルと干 渉量を変えながら評価した.IEEE 802.11gの通信速度は 6 Mbps に固定した.シミュレータとしては Scenargie [23] を用いた.



図 11 実験環境:同種のシステムから受ける影響







実機での評価環境を図 11 に示す. IEEE 802.11g で動 作する2組のノードをアドホックモードで動作させ, 混合 分配器と同軸ケーブルで接続した.また, 2組のシステム を混合分配器を介して接続した.2組のシステムの干渉量 をステップアッテネータで調節することで2組のシステム 間の距離の変更を模擬した.スループットは iPerf を用い, 2組のリンクのスループットの総量を測定した.

図 12, 図 13, 図 14 に, それぞれ実機, 提案システム, シミュレータによる評価結果を示す. 横軸は2組のリンク 間の干渉量, 縦軸は2組のリンクのスループットを足した 総量である. 図 12, 図 13, 図 14 より, 次の3つのことが 分かる.

1つ目は、すべての評価において、干渉量が小さいとき にはスループットが約 100%を達成していることである. 干渉量が小さい飽和領域においては、提案システム、実機、 シミュレーションの結果がほぼ一致していると見ることが できる.これは、2つのリンクが十分に離れている場合に は、互いに CSMA が働くことなく、独立した通信路とし て最大スループットが各々得られるからだと考えられる.

2つ目は、すべての評価において、2組のチャネルが近 く、干渉量が大きい領域ではスループットが約50%になる ことである.干渉量が大きい飽和領域においても、提案シ



図 13 エミュレータ(提案システム)での実験結果:同種のシステ ムから受ける影響

Fig. 13 Experimental setup with a proposed emulator: Interference among same systems.





ステム,実機,シミュレーションの結果が一致していると 見ることができる.これは2つのリンクが互いに受信し合 う領域では,CSMAの働きにより,帯域が共有されるから だと考えられる.

3つ目は,提案システムと実機でのスループットは干渉 量が増加するに従ってS字カーブを描いて減少しているの に対し,シミュレーションでは離散的に変化することであ る.特に一方のシステムが1チャネルや3チャネルを使っ ている場合にはシミュレータではつねに約100%のスルー プットを達成しているのに対し,提案システムや実機では スループットの減少が見られる.IEEE 802.11で規定され ているスペクトラムマスクの特性により,離れたチャネル であっても互いのリンク間の干渉量が大きい場合には影響 が生じうるからだと考えられる.

# 5. 議論

## 5.1 スケーラビリティに関する議論

2.1 節に示した要件である数百台規模のスケーラビリティ を本提案無線システムエミュレータが有しているかどう かは、アーキテクチャ的なスケーラビリティと今回の実装







図 16 空間エミュレータが複数台の場合 Fig. 16 The case of multiple air emulators.

でのスケーラビリティに分けて議論する必要がある.アー キテクチャ的なスケーラビリティは、検証したい無線シス テムの帯域幅, FPGA間のインタフェースの速度,1つの FPGA が具備したトランシーバ数で決まる.

アーキテクチャ的なスケーラビリティの議論を単純化 するために、1つの無線ノードエミュレータには1つの FPGA が、1つの空間エミュレータにも1つの FPGA が 具備されているとする.各無線ノードエミュレータや空間 エミュレータが複数の FPGA を具備することも可能であ るが、その場合には FPGA 間の通信処理による遅延で即 時性が犠牲になる.

無線ノードエミュレータや空間エミュレータがそれぞれ 1 台の FPGA を具備している場合,本提案無線システムエ ミュレータが具備できる無線ノードエミュレータの数は各 FPGA のトランシーバの数で決まる.各無線ノードエミュ レータは,自無線ノードエミュレータ以外が出力した信号 を空間エミュレータで重畳したものを受け取る.空間エ ミュレータが1台だった場合,図15のような接続になる. この場合,無線ノードエミュレータは1つのトランシーバ, 空間エミュレータは無線ノードエミュレータの数だけのト ランシーバを具備する必要がある.空間エミュレータ上の 処理は,出力先の無線ノードエミュレータに対して独立で 実行できるため,複数の空間エミュレータに分散すること ができる.たとえば,図16のように出力先の無線ノード エミュレータごとに空間エミュレータを用意することも可 能である.ただし,この場合には無線ノードエミュレータ は空間エミュレータの数だけのトランシーバを具備する必 要がある.

上記の条件において、本提案システムでサポートできる ノード数は以下のとおりとなる。検証したい無線システム の帯域幅を *B* [Hz], FPGA ボード間のインタフェースの速 度を *R* [bps], 信号幅を *W* [bit] とすると、1 つの無線ノー ドエミュレータで具備できるノード数 *n<sub>vm</sub>* は、複数の仮想 マシンが FPGA 上の1 つのトランシーバを共有するため、

$$n_{vm} = \left\lfloor \frac{R}{W \times 2B} \right\rfloor \tag{1}$$

となる. 無線システムの帯域幅に2を乗算しているのは, 標本化定理によって2倍の速度でサンプリングする必要が あるからである.システム全体で扱えるノード数 n<sub>total</sub> は 1つの FPGA あたりのトランシーバ数を*C*とすると,

$$n_{total} = n_{vm}C\tag{2}$$

となる.

本論文での実装では、無線ノードエミュレータや空間エ ミュレータの基板サイズを筐体に収めたいという理由か ら、実装した4台の FPGA ボードを miniSAS によって相 互接続して1つの空間エミュレータを模擬している.その ため、理想的なハードウェア構成と比較して miniSAS で 転送する分だけ遅延が生じている。本論文に示した実装で は、FPGA ボード間のインタフェース速度 R は 10 Gbps, 1 つの FPGA あたりのトランシーバ数 C は 16 であるた め、検証対象の無線システムの帯域幅 B を 100 MHz,信 号幅 W を 33 bit (I 信号を 14 bit, Q 信号を 14 bit, ゲイン を 5 bit) とすると、 $n_{vm}$  は式 (1) を用いて

$$n_{vm} = \left\lfloor \frac{10 \times 10^9}{33 \times 2 \times 100 \times 10^6} \right\rfloor = 1$$

となる. トランシーバ数 C は 16 であるため, n<sub>total</sub> は式 (2) を用いて

 $n_{total} = 1 \times 16 = 16$ 

となる. 検証対象の無線システムの帯域幅 B を 20 MHz, 信号幅 W を 33 bit とした場合では, n<sub>total</sub> は 112 となる.

より高性能の FPGA を用いることでシステム全体で扱 えるノード数をさらに増やすことができる.たとえば現在 の最先端 FPGA である Xilinx 社の XC7VX1140T [24] で は、13.1 Gbps のトランシーバ 96 個を有しているので、検 証対象の帯域幅 *B* が 20 MHz,信号幅 *W* が 33 bit の場合 では 672 ノードでの検証ができるシステムを実現すること ができる.

## **5.2** CPU・GPU 処理との比較に関する議論

CPU や GPU を用いて, 無線ノードエミュレータと空間

エミュレータをソフトウェアのみで実装することも可能で ある.演算処理だけに着目した場合,現在の最先端の CPU が数百 GFLOPS,最先端の GPU が数千 GFLOPS [25],最 先端の FPGA が数千 GMAC/s となり [24], GPU は FPGA と同等の演算性能を有していると考えられる.しかしなが ら,CPU や GPU を用いた場合には各要素間の通信速度 がボトルネックになって本提案システム程のスケーラビリ ティは実現できない.

まず、1 台の PC で無線ノードと伝搬路をエミュレート することを考える、1 台の PC で無線ノードと伝搬路をエ ミュレートする場合、並列化が容易な伝搬路の演算を GPU で、複雑な処理が多い無線ノードの処理を CPU で処理し たとする、CPU や GPU で処理するデータは PCI Express を介してやりとりされるため、PCI Express のデータ転送 速度がボトルネックになる、

現在の PCI Express の主流である PCI Express  $2.0 \times 16$ では、データ転送速度は 16.0 GB/s = 128 Gbps である。 図 17 に CPU と GPU の通信を示す。CPU で無線ノー ドエミュレータ、GPU で空間エミュレータを実装したと すると、ノード間の無線通信の 1 サンプルごとに CPU か ら PCI Express、PCI Express から GPU、GPU から PCI Express、PCI Express から CPU の合計 4 回のデータ転送 が発生する。合計 4 回のデータ転送が 1 つの PCI Express で共有されるため、1 つのデータ転送あたりのデータ転送 速度は  $128 \div 4 = 32 \text{ Gbps} となる$ .

4章に示した実装では、サンプリング速度が 200 MHz (検 証対象が 100 MHz),信号幅が 33 bit であったため、各要 素間でやりとりされるデータ量は 6.6 Gbps となる.上記 で算出した 4 回のデータ転送がそれぞれ 6.6 Gbps 発生し た場合、わずか 5 ノードで PCI Express のデータ転送速度 を超えてしまう.ただし、PCI Express は今後高速化する ことが考えられるため、将来的にはもう少し多いノード数 での検証ができるようになる可能性がある.

PCI Express のオーバヘッドを最小化するために,実装 上の工夫を駆使して,無線ノードエミュレータの無線通 信抽象化層と空間エミュレータのすべての処理を1つの GPU 上に実装するという手段も考えられる.現在のGPU





の最先端である Tesla K40 は 288 GB/s = 2,304 Gbps のグ ラフィックメモリを 12 GB, 4.29 TFLOPS の演算能力を備 えている [25]. たとえば IEEE 802.11 を無線通信抽象化層 として検証する場合では, CSMA (Carrier Sense Multiple Access) や自動再送要求などの MAC層の処理や, チャネル 推定, フーリエ変換, ビタビ復号, 64-QAM, FEC (Forward Error Correction) などの物理層の処理を実装する必要が ある. 一般的にはこのような複雑な処理を GPU で効率的 に実行するのは困難である. しかしながら, もしこれらの 多様な処理を GPU 上で効率的に実装することができれば, 16 ノードのエミュレーションに対応できる可能性がある.

次に、複数台の PC を連携してスケーラビリティを上 げることを考える.この場合には、PC間を接続するネッ トワークがボトルネックになる.現在の多くの PC が標 準で具備しているギガビットイーサネットでは, 通信速 度が1Gbpsであるため、4章に示したサンプリング速度 200 MHz・信号幅 33 bit によって発生する 6.6 Gbps のトラ ヒックを通すことができない. 仮により高速なネットワー クを用いることができたとしても,様々な要因によって本 提案システムで満たしている 2μ 秒以下の遅延を実現する ことができない. たとえば, デバイスドライバなどの存在 によって通信遅延が発生することが想定される.現状の ギガビットイーサネットを用いて, Ubuntu 12.04 LTS を 具備した2台の Panasonic Let's note B11 をイーサネット ケーブルで直結して遅延を計測したところ,数百μ秒の遅 延が観測された.また、図5と図6に示した複数のマルチ パスによる経路変動を計算した後にこれらを加算するため には, すべてのパスの計算の終了を待ってから加算処理を 行う必要がある. すなわち, 各パスの計算量の変動にとも なう演算時間の差や通信遅延の変動にともなう遅延の差を 吸収するバッファ処理時間の存在により、遅延はさらに大 きくなる.

## 5.3 電波の表現能力に関する議論

本提案システムでは、デジタル I/Q データを源泉と持た ない信号源も扱うことができる. 無線 LAN などの BPSK, QPSK, QAM などのデジタル変復調を行う無線システム では、そのまま直交データが I/Q データとして空間エミュ レータ部に入力される. 従来の AM, FM などのアナログ 変復調方式の場合には、提案システムの無線通信抽象化層 のフロントエンド部においてアナログ信号が直交変換され て I/Q データとして空間エミュレータ部に入力される. た とえば AM の場合には I/Q 平面の振幅を用いて、FM の場 合には I/Q 平面の位相角を用いることで再現できる.

また,環境ノイズや2.4 GHz帯の電子レンジ信号などの 振幅や位相がともに複雑に変化する信号波を直交変換した データとして記録しておくことで,これらの信号を任意の タイミングで再現することができる.たとえば,実際の電 子レンジが動作している環境で検証対象の帯域の電磁波を ソフトウェア無線機で直交復調してデジタル I/Q データと して取り込む.取り込んだデジタル I/Q データを本提案無 線システムエミュレータ上に入力することで,電子レンジ による干渉の影響を繰り返し検証することができる.

さらに、MIMOの検証を行うこともできる。MIMOで は、送信と受信のアンテナの組それぞれに対してマルチ パスが発生する。本無線システムエミュレータで MIMO を再現する場合には、送信と受信のアンテナの組それぞ れに対して SFP+インタフェースを割り当てる。現在の実 装では、1つの PC に接続された4台の FPGA ボードを miniSAS を介して連携させることで、16×16の MIMO ま で検証することができる。

5.4 フェーディングエミュレータとの比較に関する議論 フェーディングエミュレータの中で,デジタル I/Q デー

タをインタフェースとした Agilent Technologies N5106A PXB Baseband Generator and Channel Emulator (以 下 N5106A) [26] や Rohde & Schwarz AMU200A (以下 AMU200A) [27] などの製品が存在する. これらのフェー ディングエミュレータと本提案無線システムエミュレータ はハードウェアで伝搬路をエミュレートしているという点 は共通であるものの,目的とハードウェアによる伝搬路の エミュレート以外の機能が異なる.

まず, デジタル I/Q データをインタフェースとしたフェー ディングエミュレータは, 1対また2対程度の小数の無線 ノード間の伝搬路の特性を変えながら無線通信の物理層の 挙動を詳細に検証することを目的としている.そのため, 多様な伝搬パラメータを GUI (Graphical User Interface) を介して設定できることや,高周波標準信号発生器などと 連動されるインタフェースなどの部分に重点がおかれてい る.たとえば N5106A や AMU200A では伝搬路において 様々なパラメータを設定する機能が提供されている.

それに対して,提案している無線システムエミュレータ では,多数のノード間において,無線通信の伝搬路の挙動 だけでなく,相互の干渉や,無線システムを構築するモバ イル IP や認証方式など上位層との相互作用を含めてシス テム検証をすることを目的としている.このような上位層 と下位層の相互作用を再現するために,本提案システムで は,仮想マシンを基軸とした無線通信抽象化層とを組み合わ せることで,スケーラブルな検証環境を実現している点に 特徴がある.提案システムにおいても,前述した N5106A や AMU200A と同様の伝搬路の設定は可能であるが,目的 が異なるために,GUI や高周波標準信号発生器などとのイ ンタフェースは提供していない.

一方で,N5106A や AMU200A では最大でも数台のノー ド間の伝搬路しか検証できないのに対して,本提案システ ムでは数十台から数百台のノード間で相互作用が生じる無 線通信システムの検証を上位層も含めて実施することがで きる.ただし,N5106A や AMU200A を複数台用いれば数 十台規模の伝搬路を再現することは不可能ではない.たと えば,4章に示した16ノードの相互接続の検証を行う場合 には,分配器,混合器,評価対象となる個々の無線局を用 意したうえで,AMU200A を伝搬路の台数分である240 台 並べることで同様のことが実現できる.

# 6. おわりに

本論文では、実電波を輻射することなく、多数の異方式 無線通信システムが混在、または連携する複雑な運用環境 におけるシステム評価を可能とする無線システムエミュ レータを提案し、その実装と評価について述べた.実装に より、提案した無線システムエミュレータでは、異なる周 波数や異なる方式の混在する複雑な無線システムの評価 を、実時間で行えることが確認された.

謝辞 本論文の執筆にあたり、ご指導、協力をいただい た Marc Emmelmann 氏, 塙雅典氏, 鳥養映子氏, 林英輔氏 に多大なる感謝をいたします.実装および評価について, 山田敏央氏, 船田悟史氏, 宇野正憲氏, 高井峰生氏, 金田 繁氏と大熊直彦氏の各位の協力に感謝いたします.また, 本評価システムの評価実験は, NICT StarBED のご協力に より,実環境を構築し行わせていただきましたことを,感 謝を込めてここに記します.

## 参考文献

- Bahl, P., Chandray, R., Moscibroday, T., Murty, R. and Welsh, M.: White Space Networking with Wi-Fi like Connectivity, Proc. Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIG-COMM '09), Barcelona, Spain, pp.27–38 (2009).
- [2] Chandrasekhar, V., Andrews, J.G. and Gatherer, A.: Femtocell Networks: A Survey, *IEEE Communications Magazine*, Vol.46, No.9, pp.59–67 (2008).
- [3] Miyachi, T., Nakagawa, T., Chinen, K., Miwa, S. and Shinoda, Y.: StarBED and SpringOS Architectures and Their Performance, Proc. 7th International ICST Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, Shanghai, China, pp.43–58 (2011).
- [4] Spencer, Q.H., Peel, C.B., Swindlehurst, A.L. and Haardt, M.: An Introduction to the Multi-User MIMO Downlink, *IEEE Communications Magazine*, Vol.42, No.10, pp.60–67 (2004).
- [5] Khandekar, A., Bhushan, N., Tingfang, J. and Vanghi, V.: LTE-Advanced: Heterogeneous Networks, *Proc. European Wireless Conference (EW '10)*, Lucca, Italy, pp.978–982 (2010).
- [6] 仲川史彦:「YRP ワイヤレス IOT サービス」の概要, CIAJ Journal, Vol.51, No.9, pp.20-23 (2011).
- [7] Bhanage, G., Seskar, I., Mahindra, R. and Raychaudhuri, D.: Virtual Basestation: Architecture for an Open Shared WiMAX Framework, Proc. 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infras-

tructure Systems and Architectures (VISA '10), New Delhi, India, pp.1–8 (2010).

- [8] 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 (IEEE WCNC '05), New Orleans, Los Angels, Vol.3, pp.1664–1669 (2005).
- [9] Papadimitriou, D., Fabrega, L., Vila, P., Careglio, D. and Demeester, P.: Measurement-based Research: Methodology, Experiments, and Tools, ACM SIG-COMM Computer Communication Review, Vol.42, No.5, pp.62–68 (2012).
- [10] Hibler, M., Ricci, R., Stoller, L., Duerig, J., Guruprasad, S., Stack, T., Webb, K. and Lepreau, J.: Largescale Virtualization in the Emulab Network Testbed, *Proc. USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC '08)*, Boston, Massachusetts, pp.113–128 (2008).
- [11] Scalable Network Technologies: QualNet, available from (http://www.qualnet.com/).
- [12] Scalable Network Technologies: EXata, available from (http://web.scalable-networks.com/content/exata).
- [13] Henderson, T.R., Lacage, M. and Riley, G.F.: Network Simulations with the ns-3 Simulator, Proc. Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'08), Seattle, Washington, p.527 (2008).
- [14] Varga, A. and Hornig, R.: An Overview of the OM-NeT++ Simulation Environment, Proc. 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMU-Tools '08), Marseille, France, pp.1–10 (2008).
- [15] 神谷弘樹, 渋井理恵, 寺岡文男: IP モビリティ実験のための無線環境エミュレータの試作, 情報処理学会研究報告,マルチメディア通信と分散処理研究会, 2004-DPS-118, pp.19-24 (2004).
- [16] 小泉 稔,江端智一,堤 智昭,大島浩太,寺田松昭: 高精度時刻同期を特徴とする分散型モバイルネットワー クエミュレータ,情報処理学会論文誌, Vol.53, No.2, pp.754-769 (2012).
- [17] Judd, G. and Steenkiste, P.: Using Emulation to Understand and Improve Wireless Networks and Applications, Proc. 2nd Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI'05), Boston, Massachusetts, pp.203–216 (2005).
- [18] 中内清秀,西永 望,真野 浩,原田博司:複数アナログ 入出力ワイヤレスネットワークエミュレータシステムの 概要,電子情報通信学会ソサイエティ大会 (2011).
- [19] Maltsev, A., Khoryaev, A., Lomayev, A., Maslennikov, R., Shilov, M., Pestretsov, V. and Sevastyanov, A.: Hardware Link Level Emulator for System Level Simulations of WiMAX-like Systems, Proc. ICT Mobile and Wireless Communications Summit (ICT-MobileSummit '08), Stockholm, Sweden, pp.1–8 (2008).
- [20] ITU-R: Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, Recommendation ITU-R, M.1225 (1997).
- [21] IEEE: IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD), IEEE 802.16m-08/004r2 (2008).
- [22] IEEE: IEEE P802.11 Wireless LANs TGn Channel Models, IEEE 802.11-03/940r4 (2004).
- [23] Space-Time Engineering: Scenargie, available from  $\langle http://www.spacetime-eng.com/ \rangle$ .
- [24] Xilinx: 7 Series FPGAs Overview, Data Sheet, DS180

(2013).

- [25] NVIDIA: Tesla Kepler Family Product Overview (2013), available from (http://www.nvidia.com).
- [26] Agilent Technologies: N5106A PXB Baseband Generator and Channel Emulator, Data Sheet (2012).
- [27] Rohde & Schwarz: AMU200A Baseband Signal Generator and Fading Simulator, Data Sheet (2007).



# 真野浩 (正会員)

1983 年湘南工科大学工学部卒業. 1993~2011 年ルート株式会社代表取 締役,2005~2008 年アライドテレシス ホールディングス CTO,2011~2013 年アライドテレシス開発センター取 締役,現在,コーデンテクノインフォ

株式会社代表取締役.2013年より山梨大学大学院博士課 程在学中.主に通信分野の研究開発・標準化に従事.2011 年~IEEE802.11TGai チェア,電子情報通信学会,IEEE 各会員.



**猿渡 俊介** (正会員)

2007 年東京大学大学院博士課程修 了.科学博士.2003~2004 年 IPA 未 踏ソフトウェア創造事業,2006~2008 年日本学術振興会学振特別研究員, 2007~2008 年イリノイ大学客員研究 員,2008~20012 年東京大学先端科学

技術研究センター助教,2012年より静岡大学大学院情報学 研究科助教.2013年より理化学研究所と産業技術総合研究 所にて客員研究員.専門はワイヤレスネットワーク,セン サネットワーク,システムソフトウェア等.2009年電子情 報通信学会論文賞.2010年情報処理学会山下記念研究賞. 電子情報通信学会,IEEE,ACM 各会員.