

無線システムエミュレータの実装と評価

真野 浩 猿渡 俊介

受付日 2013年9月13日, 採録日 2014年2月17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事無く, 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 SHUNSUKE SARUWATARI

Received: September 13, 2013, Accepted: February 17, 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, Virtualization, FPGA

1. はじめに

20世紀初頭, 電波の割り当ては情報通信技術が未発達
の時代に干渉を避けるという目的で始まった。当時の電波は用途毎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, センサーネットワーク等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楽しむようになった。電波を利用したトラフィックは今後も増加し続けて行くと考えられる。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。

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

¹ 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

² 静岡大学 大学院情報学研究科
Graduate School of Infomatics, Shizuoka University

へと変化し始めている。例えば、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事で、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、複数の基地局同士が連携しながら、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、再現性の無さや既存システムに与える影響等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。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通りである。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。例えば、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ー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、無線局のみならず、複数の要素の連携により構成される複雑性をも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す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ラビリティが必要となる。

本研究では、スケラビリティとして、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(隣接チャンネル干渉を含む)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。既に、LTE, IEEE 802 等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 章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挙げられる。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 等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等をシステム毎に調整する事が必要となる。

再現性が高く、かつスケ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挙げられる。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。例えば、まず、無線システムのもつ変調方式(BPSK, QPSK 等)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、周波数等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。この時、伝搬路に存在する反射物や移動に伴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ン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、毎回全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。例えば、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樣に生じる場合と、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挙げられる。電波伝搬エミュレータでは、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

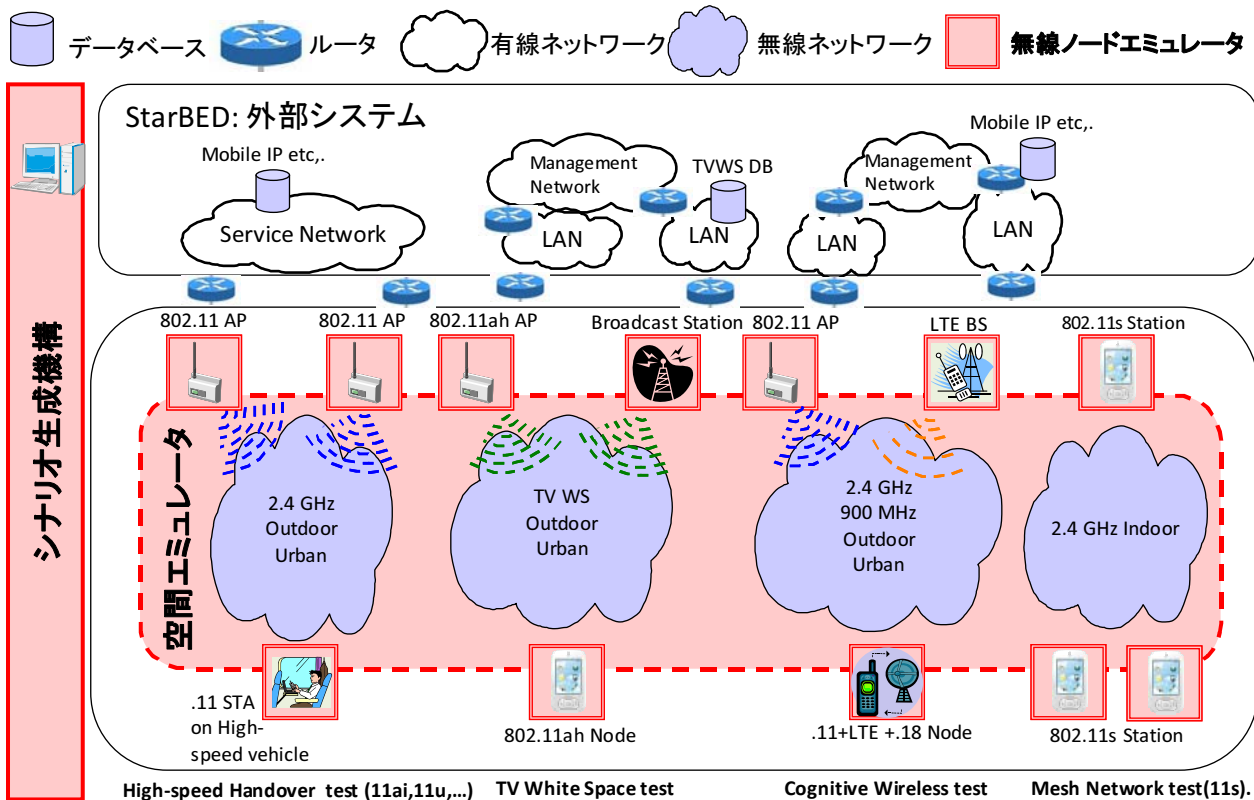


図 1 システム全体像
Fig. 1 System overview

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上に高コストになり、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でリアルタイムで直接的に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

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

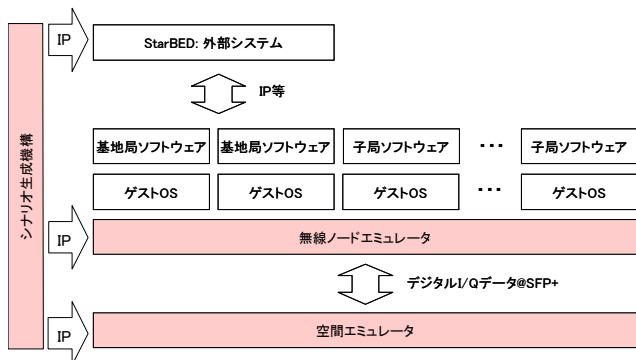


図 2 システム構成図
Fig. 2 System components

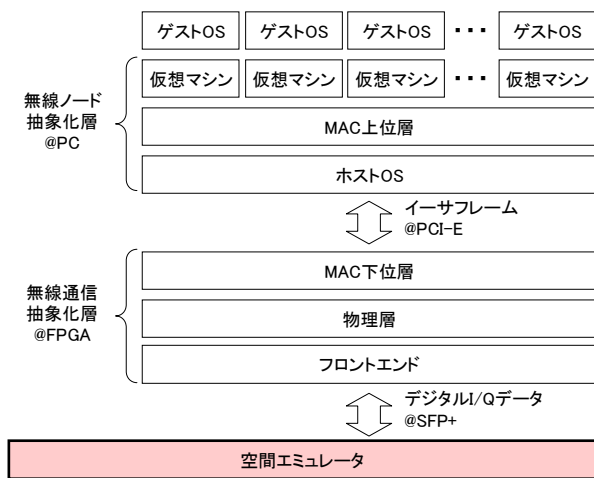


図 3 無線ノードエミュレータ
Fig. 3 Wireless node emulator

する事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 等を介して接続する。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。例えばゲスト 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 及び 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ン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。

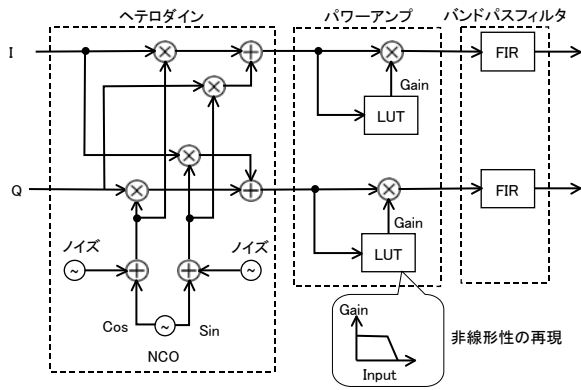


図 4 フロントエンド送信部
Fig. 4 TX part of frontend

本提案システムの特徴であるデジタル I/Q データに統一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等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、全てをデジタル 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ン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 Oscillator) 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ンネルフィルタを模倣し、隣接チャンネルに対するスペクトラムマスク等を模倣する。フロントエンドの受信部では、同様の処理を逆順に行なう。

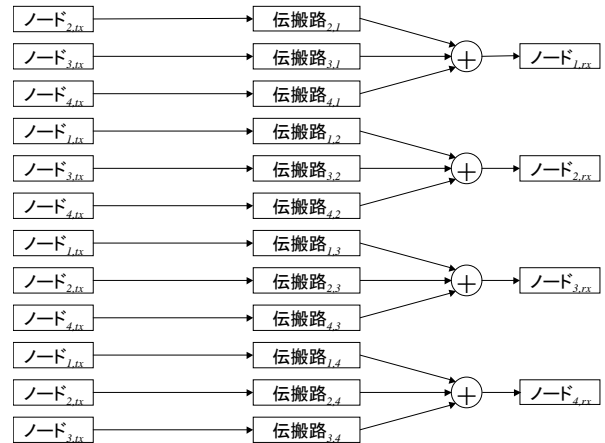


図 5 空間エミュレータ
Fig. 5 Air emulator

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 i,tx はノード i の送信ポート、ノード i,rx はノード i の受信ポート、伝搬路 i,j 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 i,j に入力される。伝搬路 i,j 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、直接波及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_0 だけ遅延を与える。次に、伝搬損失 L_0 が乗算される。伝搬損失 L_0 は、2 波モデルや秦モデル等と、各種障害物等の通過損失、無線ノードに利用するアンテナ特性及び相対的な位置、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_0 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、全てのパスを

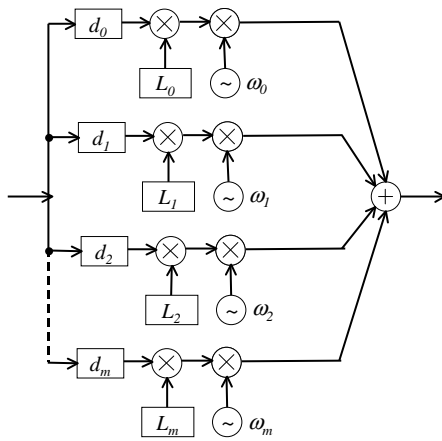


図 6 伝搬路の内部構成

Fig. 6 Internal structure of a propagation path

加算する事により実現する．図 6 では， m 個のマルチパスが構成されており， d_i, L_i, ω_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ィングを，損失 L_i 及び位相 ω_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．

ドップラースhiftも同様の仕組みで再現できる．ドップラースhiftは，マルチパスの各経路に対して，遅延，損失，ドップラースpektrumで表現される．そのドップラースpektrumに相当するのが図 6 のうち， ω_n で与えられる信号成分となる．例えば，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ン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 IEEE802.11n 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することも可能である．

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

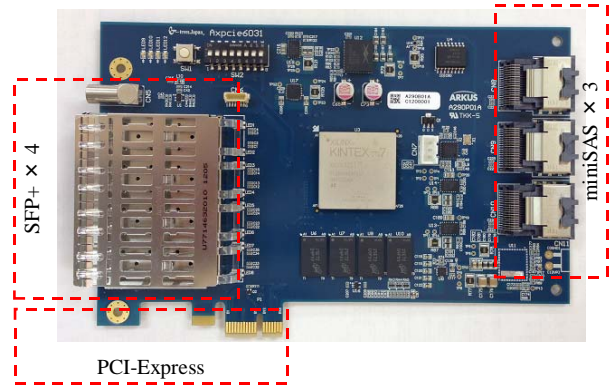


図 7 FPGA ボード

Fig. 7 FPGA board

d_i ，伝搬損失 L_i ，位相変動 ω_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，チャンネルモデル，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 ω_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事で，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することもできる．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出来る．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事もできる．

4. 実装と評価

3 章に示した無線ノードエミュレータ及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

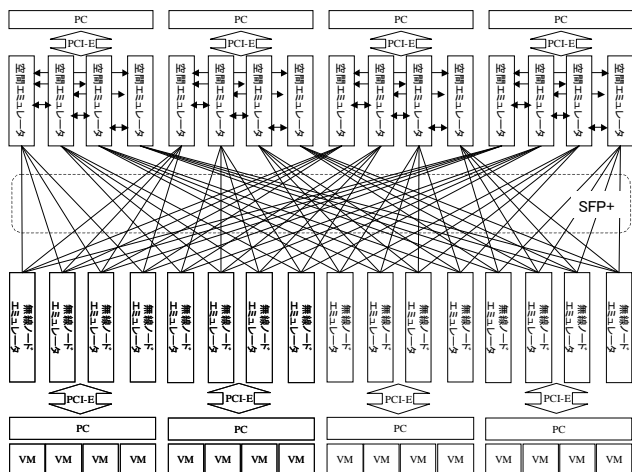


図 8 16 ノードの接続例
Fig. 8 16 nodes topology

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 119835 個、フリップフロップ (FF) の使用数が 101677 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 2424 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 203800 個、フリップフロップを 407600 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 の設計ツール及びロジックアナライザにより確認した。信

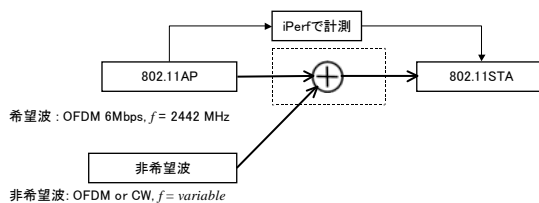


図 9 評価環境: 異種システムからの影響
Fig. 9 Experimental setup: Effect of a different system

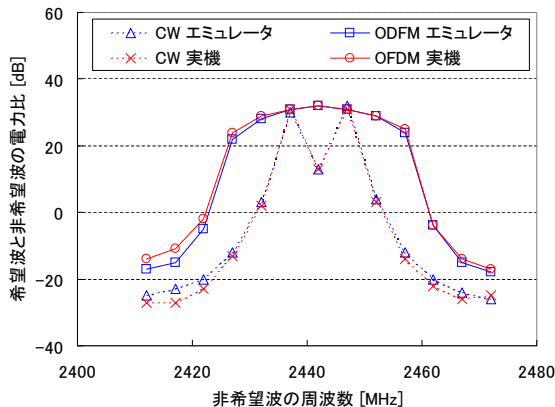


図 10 評価結果: 異種システムからの影響
Fig. 10 Experimental results: Interference from a different system

号幅を 33 ビット、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。例えば、IEEE 802.11 が想定する信号処理遅延は 2 μ 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 2442MHz 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 2412 MHz から 2472 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共に 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。例えば、横軸が 2412 MHz で、縦軸が -18 dB の点は、中心周波数が 2412 MHz の非希望波を、電力を増やしなが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、非希望波の中心周波数が希望波の中心周波数である 2442 MHz に近づくにしたがって、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 2437 MHz か 2447 MHz の時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 2442 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辛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、非希望波の種類に依らず、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言える。

4.3 同種のシステムから受ける影響の評価

4.2 章では、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。それに対して本章では、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 組の通信チャンネルを 7 チャンネルに固定し、もう 1 組の通信チャン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。

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

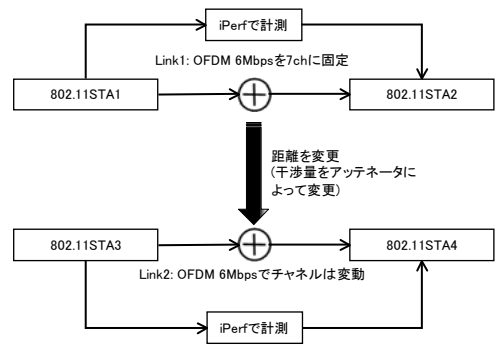


図 11 実験環境: 同種のシステムから受ける影響

Fig. 11 Experimental setup: Interference among same systems

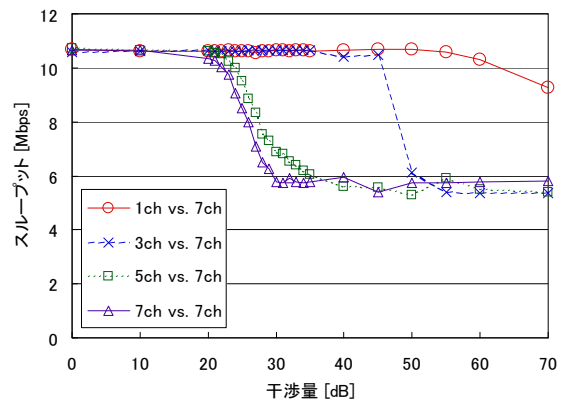


図 12 実機での実験結果: 同種のシステムから受ける影響

Fig. 12 Experimental results with real equipments: Interference among same systems

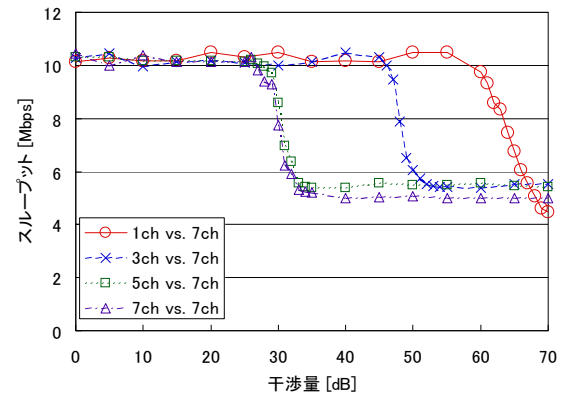


図 13 エミュレータ (提案システム) での実験結果: 同種のシステムから受ける影響

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

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

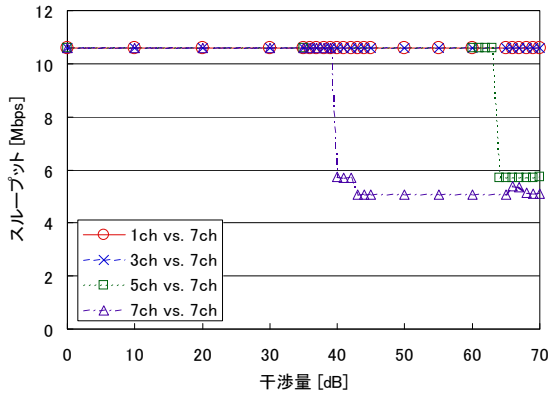


図 14 シミュレータでの実験結果: 同種のシステムから受ける影響
Fig. 14 Experimental setup with a simulator: Interference among same systems

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, 全ての評価において, 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 が働く事無く, 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, 全ての評価において, 2 組のチャンネルが近く, 干渉量大きい領域ではスループットが約 50% になることである. 干渉量大きい飽和領域においても, 提案システム, 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したがって 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 チャンネルや 3 チャンネルを使っている場合にはシミュレータでは常に約 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, 離れたチャンネルであっても互いのリンク間の干渉量大きい場合には影響が生じ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 章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

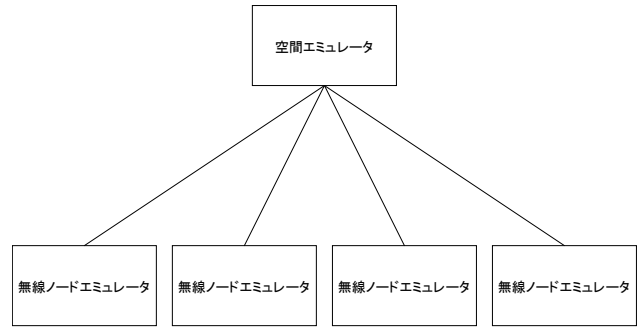


図 15 空間エミュレータが 1 台の場合
Fig. 15 The case of one air emulator

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. 例えば, 図 16 のように出力先の無線ノードエミュレータ毎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通りとなる. 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_{vm} は, 複数の仮想マシンが FPGA 上の 1 つトランシーバを共有するため,

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

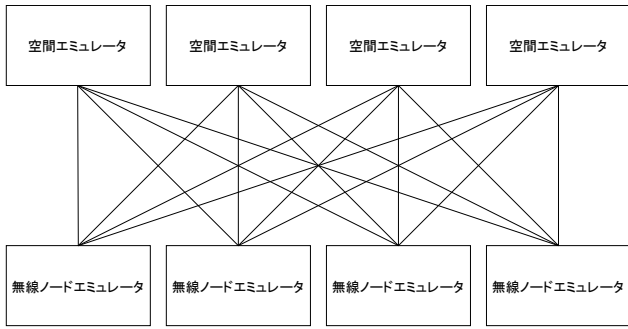


図 16 空間エミュレータが複数台の場合
Fig. 16 The case of multiple air emulators

となる．無線システムの帯域幅に 2 を乗算しているのは、標準化定理によって 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_{total} は 1 つの FPGA あたりのトランシーバ数を C とすると、

$$n_{total} = n_{vm}C \quad (2)$$

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 14bit, 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_{total} 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_{total} 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．例えば現在の最先端 FPGA である Xilinx 社の XC7VX1140T [24] では、13.1 Gbps のトランシーバ 96 個を有しているため、検証対象の帯域幅 B が 20 MHz、信号幅 W を 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

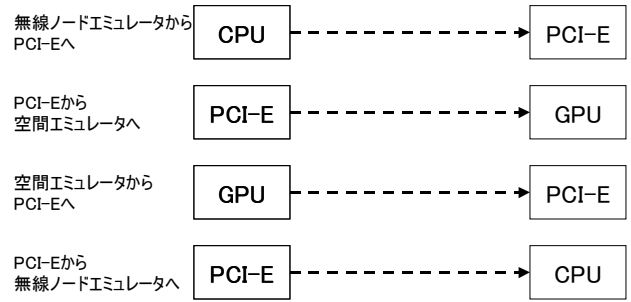


図 17 PCI Express を介した通信
Fig. 17 Communication via PCI Express

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 × 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 サンプル毎に 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 $128 \div 4 = 32$ 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、各要素間でやり取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 のオーバー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全ての処理を 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 = 2304 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]。例えば IEEE 802.11 を無線通信抽象化層として検証する場合には, 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られることを考える。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 1 Gbps 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。例えば, 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, 全てのパスの計算の終了を待ってから加算処理を行なう必要がある。すなわち, 各パスの計算量の変動に伴う演算時間の差や通信遅延の変動に伴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 等の BPSK, QPSK, QAM 等のデジタル変復調を行な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。例えば 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共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。例えば, 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 mini SAS 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等と連動されるインタフェース等の部分に重点がおかれている。例えば 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等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の再現することは不可能ではない。例えば、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台並べることと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、実時間でこなえることが確認された。

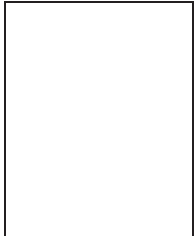
謝辞

本論文の執筆にあたり、ご指導、協力を頂いた Marc Emmelmann 氏、埴 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。実装及び評価について、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を感謝いたします。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

- [1] Bahl, P., Chandray, R., Moscibrodsky, T., Murty, R. and Welsh, M.: White Space Networking with Wi-Fi like Connectivity, *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'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, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Virtualized Infrastructure Systems and Architectures (VISA'10)*, New Delhi, India, pp. 1–8 (2010).
- [8] Raychaudhuri, D., Seskar, I., Ott, M., Ganu, S., Ramachandran, K., Kremos, H., Siracusa, R., Liu, H. and Singh, M.: Overview of the ORBIT Radio Grid Testbed for Evaluation of Next-generation Wireless Network Protocols, *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'05)*, Vol. 3, New Orleans, Louisiana, pp. 1664–1669 (2005).
- [9] Papadimitriou, D., Fabrega, L., Vila, P., Careglio, D. and Demeester, P.: Measurement-based Research: Methodology, Experiments, and Tools, *ACM SIGCOMM 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.: Large-scale Virtualization in the Emulab Network Testbed, *Proceedings of USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC'08)*, Boston, Massachusetts, pp. 113–128 (2008).
- [11] Scalable Network Technologies: QualNet. <http://www.qualnet.com/>.
- [12] Scalable Network Technologies: EXata. <http://web.scalable-networks.com/content/exata>.
- [13] Henderson, T. R., Lacage, M. and Riley, G. F.: Network Simulations with the ns-3 Simulator, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems (SIMUTools'08)*, Marseille, France, pp. 1–10 (2008).
- [15] 神谷弘樹, 洪井理恵, 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, *Proceedings of the 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, *Proceedings of the 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).

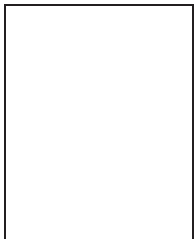
- [23] Space-Time Engineering: Scenargie.
<http://www.spacetime-eng.com/>.
- [24] Xilinx: 7 Series FPGAs Overview, *Data Sheet, DS180* (2013).
- [25] NVIDIA: Tesla Kepler Family Product Overview (2013).
<http://www.nvidia.com>.
- [26] Agilent Technologies: N5106A PXB Baseband Generator and Channel Emulator, *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・工卒．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．