

シミュレータと仮想マシンを連携した 高忠実度評価環境の提案

河合 孔明^{1,a)} 金田 茂^{2,b)} 高井 峰生^{3,c)} 峰野 博史^{1,d)}

概要：無線 LAN 通信の評価手法である実機実験とシミュレーションは端末台数の確保、場所の確保、電波伝搬の再現、実機動作に対する忠実さの面でトレードオフ関係にある。本研究では、トレードオフ関係を解決可能な無線 LAN 評価環境である High Fidelity Emulation environment (HiFE) を提案する。HiFE は、ネットワークシミュレータの端末モデルとして仮想マシンを使用することで、実機動作に忠実な端末モデルを作成する。加えて、仮想マシンに仮想無線 LAN デバイスを実装することで、無線 LAN 通信をデバイスレベルで模擬可能にする。評価では、HiFE が実機の 96.0% のスループットを達成していることがわかり、実機と HiFE のシーケンスナンバーの変化も類似したことから、HiFE が実機動作を忠実に模擬できることがわかった。

キーワード：シミュレーション, エミュレーション, 仮想マシン, 仮想デバイス

A proposal for High Fidelity Emulation environment

Abstract:

We have been using real machines and simulators to evaluate wireless LAN communication. However, real machines and simulators are in tradeoff relationship in terms of number of real machines, field limitations, reproducibility of radio propagation, and fidelity to real environment. In this paper, we propose High Fidelity Emulation environment (HiFE) which solves the tradeoff relationship. We integrate simulator and virtual machine to create simulation models which are high fidelity to real machine. In addition, we implemented virtual wireless LAN device in virtual machine to achieve device-level emulation. In evaluation, HiFE achieved 96.0% of throughput of a real machine and similarity of incrementing of sequence number. The result shows HiFE can create fidelity environment to real environment.

Keywords: Simulation, Emulation, Virtual machine, Virtual device

1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット等のモバイル端末の普及によって、モバイルデータ通信量が大きく増加している。携帯電話基地局に対する負荷を軽減させるため、各通信事業者は対策に乗り出している。例えば、モバイルデータオフローディングと呼ばれる手法では、データ通信を携

帯電話ネットワークだけでなく、Wi-Fi を経由した固定回線や WiMAX といった別の通信経路に分散させる [1]。今後は、携帯電話ネットワークの更なる逼迫が予想されるため、モバイルデータの負荷分散手法の研究開発がより重要になると考えられる。

大規模通信向けプロトコルの研究開発では、提案手法の評価方法が課題となる。例えば、新たなモバイルデータオフローディング手法を提案する場合、評価には実機を使うべきだろうか。ネットワークシミュレータを使うべきだろうか。従来は、どちらを使うべきかは目的や経験に基づいて選択されてきた。実運用を想定した評価を行う場合には、実際のプログラムを用いて現実には得られない実機評価の方が適しているといえる。しかしながら、大

¹ 静岡大学大学院 情報学研究科
Graduate School of Informatics, Shizuoka University
² Space-Time Engineering, LLC
³ 大阪大学/カリフォルニア大学ロサンゼルス校
^{a)} kawai@minelab.jp
^{b)} skaneda@spacetime-eng.com
^{c)} mineo@ieee.org
^{d)} mineno@inf.shizuoka.ac.jp

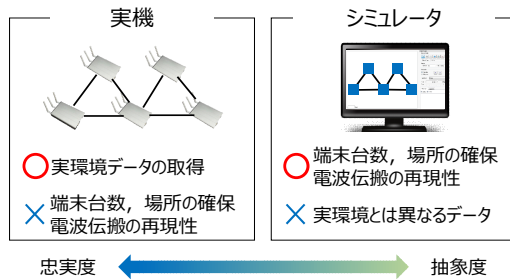


図 1 実機とネットワークシミュレータのトレードオフ関係

規模な携帯電話ネットワークを構築したい場合には、費用の面で端末台数の確保が難しいこと、広域環境が必要なこと、電波伝搬の再現が困難であることから、実機実験は現実的ではない。一方、ネットワークシミュレータは、実験環境全体をプログラムとして模擬するため、端末台数の確保、場所の確保、伝搬伝搬の再現を容易にする。しかしながら、ネットワークシミュレータ上で模擬される通信端末は、端末モデルとして高度に抽象化されているため、実機のプログラムは利用できず、実運用時のものとは異なる結果が出力される。つまり、実機とネットワークシミュレータにはそれぞれ図 1 に示す特徴があり、両者はトレードオフ関係にあるといえる。

図 1 のトレードオフ関係は、センサネットワークの分野では TOSSIM [2] に代表される、ネットワークシミュレータとエミュレータを連携させる方法で解決されてきた。しかしながら、無線 LAN 通信の分野では、無線 LAN デバイスの仕様の複雑さから、実機同様に動作する端末モデルの構築が困難であるため、トレードオフ関係は解決されてこなかった。従って、無線 LAN 通信においても、実機とネットワークシミュレータのトレードオフ関係を解決する手法が必要であり、実機動作に忠実かつ端末台数の確保、場所の確保、伝搬伝搬の再現が容易な評価環境が求められるといえる。ここで、評価環境が実機動作に忠実な状態とは、評価環境内の端末モデルが実機と同等に動作することとする。

トレードオフ関係を解決する手法として、ネットワークシミュレータと仮想マシンを連携させて、端末モデルを忠実化する手法 [3, 4] が提案されている。仮想マシンとは実機のハードウェアを模擬するソフトウェアのことである。仮想マシン上では任意のオペレーティングシステム (OS) を利用可能であり、実機の OS を改変なく利用できるため、実機に忠実な端末モデルの実装作業を容易化できる。仮想マシン上で動作する OS をゲスト OS、仮想マシンを動作させている OS をホスト OS と呼ぶ。また、ホスト OS を動作させている端末をホストマシンと呼ぶ。[3] では、ゲスト OS 内に専用のデバイスドライバをインストールすることで仮想無線 LAN インタフェースを実現しており、実機同様の無線 LAN 通信を実行可能にしている。しかしなが

ら、無線 LAN デバイスの仮想化はされていないため、割り込み処理といった実機特有の処理遅延は模擬されていない。実機特有の処理遅延を模擬するために、ネットワークシミュレータの Scenargie [4] では、仮想マシンの仮想デバイスを利用して通信を模擬している。Scenargie は仮想マシンの QEMU [5] の仮想有線 LAN デバイスと連携可能であり、割り込み処理といった実機特有の処理遅延を考慮した評価を実現できる。しかしながら、仮想有線 LAN デバイスからの送信フレームを無線 LAN フレームに見立てて無線 LAN 通信を模擬するため、無線 LAN 通信の実機に対する忠実度に課題がある。ここで、忠実度とは、時間に対する送信トラフィック量、およびその積算であるスループットが実機実験のものとの程度一致しているかを示す度合いとする。

本研究では、ネットワークシミュレータと仮想マシンの組み合わせに、仮想無線 LAN デバイスを追加することで、実機の無線 LAN 通信を忠実に模擬する、High Fidelity Emulation environment (HiFE) を実現する。本論文の構成は以下の通りである。まず、2 章では、本研究の要件を示し、関連研究の課題、および本研究の位置付けを示す。次に、3 章では、2 章で定義した要件を満たす HiFE について述べる。4 章では実機動作に対する HiFE の忠実度を評価する。最後に、5 章でまとめる。

2. 関連研究

本研究では、無線 LAN システムにおいても実機とネットワークシミュレータのトレードオフ関係を解決可能な評価環境の実現を目指す。実機とネットワークシミュレータのトレードオフ関係を解決するための要件として、下記のことを定義する。

- (1) 端末台数の確保が容易であること
- (2) 場所の確保が容易であること
- (3) 電波伝搬の再現が可能であること
- (4) 実機のプログラムを用いて評価可能であること

要件 1 は、多数の端末を必要とする無線 LAN 通信実験を行うために必要である。要件 2 は、広域環境を必要とする無線 LAN 通信実験を限られた広さの中で実現するために必要である。要件 3 は、無線 LAN 端末周辺の電波条件を固定化して、無線 LAN システムの評価結果に影響を与える外乱を削減するために必要である。要件 4 は、実運用時と同じプログラムを動作させることで評価結果の実機忠実度を向上させるために必要である。また、端末モデル作成の容易化にも繋がる。

上記の要件を実現する手法として、実機を改良する手法やネットワークシミュレータを改良する手法が提案されてきた。本章では実機を改良した手法、ネットワークシミュレータを改良した手法をそれぞれ述べ、本研究の位置付けを示す。

2.1 実機を改良した手法

実機を改良した評価環境では、実機のプログラムの使用は可能であるため、端末台数の確保、場所の確保、電波伝搬の再現が主な課題となる。端末台数の確保、および場所の確保を容易にするために、1つの端末を複数の端末として分割する手法が提案されている [6–8]。例えば、EMANE [6] では、Linux containers という仕組みを用いて Linux のネットワークインタフェースやトラフィックを分割しており、1つの端末内で多数の端末を用いた通信実験を行うことが可能である。端末台数の確保、および場所の確保を容易にする別の手法として、大規模実験環境を複数人で共有する手法もある [9–12]。StarBED³ [11] では、1000 台以上の PC を用いて大規模通信環境を物理的に構築する。トポロジや OS を自由に変更可能にし、評価環境を複数のユーザで共有することで、大規模通信環境の構築を容易にしている。しかしながら、[6–11] は通信遅延やパケットロス等の模擬を有線 LAN フレームのフィルタリングによって実現しているため、電波伝搬の模擬の忠実度に課題がある。ORBIT [12] では、実験施設の天井に無線 LAN 端末を 64 個取り付け、Web 経由で共有利用することで、実際の電波を使用した大規模通信実験の環境構築を容易にしている。しかしながら、実際の無線を使用した場合、実験環境内の無線端末同士が電波干渉を起こす可能性があり、電波伝搬の再現性の面で課題がある。

電波伝搬を再現可能にする手法として、プロトコルの動作を制御可能にする手法がある。Dummysnet [13] では、TCP 層と IP 層間のキューの長さを変更可能にすることで、帯域幅や遅延といった通信への影響を模擬する。しかしながら、電波伝搬自体の模擬はしていないため通信路の抽象度が高く、実機無線 LAN 通信に対する忠実度が課題となる。電波伝搬を再現可能にするもう一つの手法として、実機を用いた無線 LAN 通信の遅延、帯域幅、パケット損失率を記録しておき、パケットフィルタによって同じ状況を再現する手法 [14] がある。しかしながら、[14] は実機のプロトコルを改良する必要があるため、無線 LAN システムの実運用を想定した評価では実機忠実度や評価環境構築の困難さが課題となる。

電波伝搬を無線 LAN デバイスのエミュレーションによって再現可能にする手法 [15] も存在する。[15] では、無線デバイスが生成する電波波形の素となる I/Q データを用いて電波伝搬を模擬しており、実環境に忠実な電波伝搬を端末内部で模擬することが可能になった。しかしながら、電波伝搬の模擬には専用のハードウェアが必要になるため、費用や入手手段の面で端末台数を確保することが困難である。

2.2 ネットワークシミュレータを改良した手法

ネットワークシミュレータは、評価環境全体をプログラ

ムで模擬するため、端末台数の確保、場所の確保、電波伝搬の再現が容易である。従って、実機のプログラムを用いて評価可能にすることが主な課題となる。

代表的なネットワークシミュレータとして、OPNET [16]、OMNeT++ [17]、NS-2 [18]、GloMoSim [19]、QualNet [20] が挙げられる。[16–20] は実験環境全体をプログラムで模擬するため、電波伝搬やプロトコルの動作等を細かく設定可能であり、電波障害や遅延等のない理想条件下での評価に適している。しかしながら、通信端末を端末モデルとして抽象化しているため、実機のプログラムが利用できず、実機動作に忠実な評価は困難である。

ネットワークシミュレータ上で実機のプログラムを利用するために、実機の通信プロトコルをネットワークシミュレータ上で利用する手法 [14, 21, 22] が提案されている。例えば、JiST/SWANS [21] ではネットワークシミュレータが管理する離散時間に合わせて Java Virtual Machine を動作させ、実機の Java のプログラムを改変することなくネットワークシミュレータ上で利用可能にしている。しかしながら、アプリケーション層以外は抽象化されているため、端末モデル全体の実機に対する忠実度に課題が残る。

実機全体のプログラムをネットワークシミュレータ上で利用する手法として、電波伝搬をネットワークシミュレータで模擬しつつ、無線 LAN 端末として実機を用いる EXata [23] が提案されている。EXata では実機の OS を改変なく利用可能であるため、評価結果の実機忠実度を向上させることが可能である。また、実機全体のプログラムを利用する別の手法として、ネットワークシミュレータと仮想マシンを連携させる手法が [24–26] が提案されている。例えば、VirtualMesh [24] では、仮想マシンの Xen [27] とネットワークシミュレータの OMNeT++ [17] を連携させることで、電波伝搬を再現しつつ、実機の OS を利用可能な環境を実現している。しかしながら、[23–26] は有線 LAN インタフェースが送信するフレームを無線 LAN フレームに見立てて電波伝搬を模擬するため、無線 LAN 通信の実機に対する忠実度が課題となる。

無線 LAN 通信の模擬を忠実化するために、仮想マシン上で無線 LAN フレームを送信可能にする手法 [3] が提案されている。[3] では、ゲスト OS 内に専用のデバイスドライバをインストールすることで仮想無線 LAN インタフェースを実現しており、実機と同様の無線 LAN 通信を実行可能にしている。しかしながら、無線 LAN デバイスの仮想化はされていないため、割り込み処理といった実機特有の処理遅延は模擬されていない。

実機特有の処理遅延を模擬するために、仮想マシンの仮想デバイスを利用する手法が提案されている。例えば、ネットワークシミュレータの Scenargie [4] は、仮想マシンの QEMU [5] の仮想有線 LAN デバイスと連携して電波伝搬を模擬するため、割り込み処理といった実機特有の処理

表 1 実機の改良研究とネットワークシミュレータの改良研究の特徴

要件	実機の改良研究	ネットワークシミュレータの改良研究
(1) 端末台数の確保が容易	手法依存	○
(2) 場所の確保が容易	手法依存	○
(3) 電波伝搬の再現が可能	手法依存	○
(4) 実機のプログラムを実行可能	○	手法依存 (忠実度)

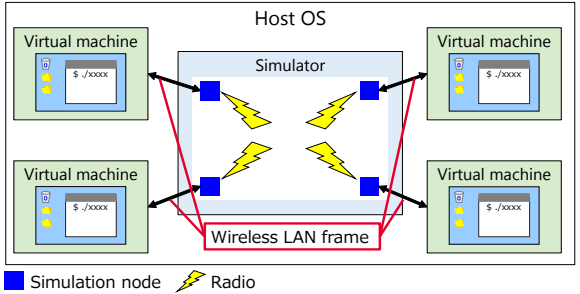


図 2 HiFE の概要

遅延を考慮した評価が可能である。しかしながら、仮想無線 LAN デバイスからの送信フレームを無線 LAN フレームに見立てて無線 LAN 通信を模擬するため、無線 LAN 通信の実機忠実度が課題となる。

2.3 本研究の位置付け

2.1 節、および 2.2 節から、実機を改良した研究とネットワークシミュレータを改良した研究には、主に表 1 の特徴があるといえる。表 1 の通り、実機を改良した研究では、実機のプログラムの利用が可能であるが、その他の要件を実現できるかは手法によって異なる。ネットワークシミュレータを改良した研究では、端末台数の確保、場所の確保、電波伝搬の再現は可能であるが、実機のプログラムを利用可能か、およびどの程度実機のプログラムを利用可能かは手法依存となり、実機忠実度が課題となる。本研究では、ネットワークシミュレータの課題の少なさに着目し、ネットワークシミュレータの改良によって全ての要件を満たす無線 LAN 通信評価環境を実現する。ネットワークシミュレータと仮想マシンの組み合わせに仮想無線 LAN デバイスを追加することで、実機の無線 LAN 通信を忠実に模擬可能にする。

3. 提案

2 章での議論を基に、無線 LAN シミュレータの動作を実機に対して忠実化する High Fidelity Emulation environment (HiFE) を提案する。図 2 に概要を示す。HiFE では、実機忠実度の高い端末モデルを実現するために、端末モデルとして仮想マシンを利用する。仮想マシンを利用することで同時にモデル実装の容易化を図る。仮想マシンには無線 LAN 通信を実現するために、仮想無線 LAN デバイスを追加する。仮想無線 LAN デバイスはネットワークシ

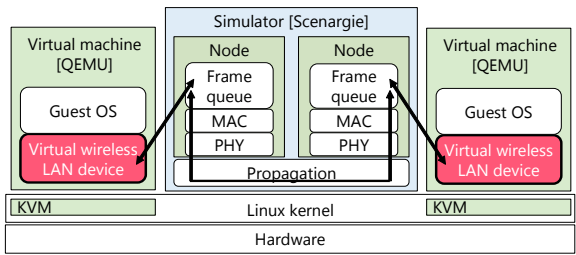


図 3 HiFE の実装

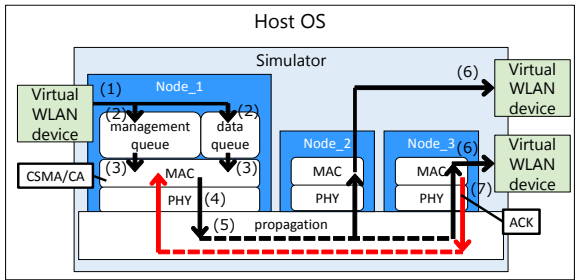


図 4 Scenargie のプロトコルスタック

ミュレータに無線 LAN フレームを転送する。ネットワークシミュレータでは、仮想マシンに関連付けられたシミュレーションノードが無線 LAN フレームを受け取る。ここで、シミュレーションノードとは、通信端末の機能のうち、ネットワークシミュレータでモデル化した部分とする。シミュレーションノードが受け取った無線 LAN フレームは電波伝搬シミュレーションに取り込まれる。ネットワークシミュレータは電波伝搬シミュレーションで電波到達範囲内にあると判断した他ノードに対し、無線 LAN フレームを転送する。無線 LAN フレームを受信したシミュレーションノードは、関連付けられた仮想マシンに無線 LAN フレームを転送する。

HiFE を実装した全体像を図 3 に示す。HiFE は多くのネットワークシミュレータや仮想マシンに適用できるが、本研究では離散事象シミュレータの Scenargie 1.8 [4] と仮想マシンの QEMU 2.1.2 [5] をそれぞれ改良して使用した。QEMU には QUALCOM Atheros 社 [28] の無線 LAN デバイスである AR9160 を模擬可能な仮想無線 LAN デバイスを追加した。仮想無線 LAN デバイスは Scenargie に対して無線 LAN フレームを送信する。Scenargie は無線 LAN フレームを電波伝搬シミュレーションに取り込み、他の QEMU の仮想無線 LAN デバイスに転送する。

3.1 Scenargie 内部の処理

図 4 に Scenargie のプロトコルスタックを示す。Scenargie での電波伝搬シミュレーションは図 4 に示した (1) から (7) の手順で行われる。

- (1) 送信側の仮想無線 LAN デバイスは Scenargie に無線 LAN フレームを転送する。
- (2) 無線 LAN フレームが MAC management frame であ

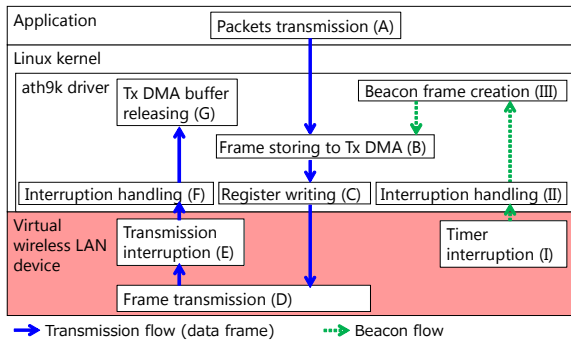


図 5 無線 LAN フレーム送信処理

る場合は management queue にフレームを格納する。無線 LAN フレームが data frame である場合は data queue に無線 LAN フレームを格納する。Scenargie の MAC 層では、CSMA/CA といったリアルタイム性が求められる MAC control frame に対する処理を模擬する。MAC 層のその他の処理は QEMU 側で行う。Scenargie には CSMA/CA におけるフレーム送信間隔である SIFS (Short Inter-Frame Space) や DIFS (Distributed Inter-Frame Space) を模擬する機能があり、MAC フレームの種類によって格納先キューを選択することで自動的にフレーム送信間隔が決定される。

- (3) MAC 層が management queue, data queue に格納された無線 LAN フレームを取り出す。
- (4) PHY 層は MAC 層から無線 LAN フレームを受け取り、propagation 層に転送する。
- (5) propagation 層では、電波到達範囲内にあるシミュレーションノードに無線 LAN フレームを転送する。
- (6) 受信側シミュレーションノードは propagation 層, PHY 層, MAC 層の順に無線 LAN フレームを転送することで受信を行う。
- (7) 受信側シミュレーションノードの MAC 層では、受信した無線 LAN フレームが自分宛てのものであるか宛先 MAC アドレスによって判断する。無線 LAN フレームの宛先が自分宛てであった場合には、送信側シミュレーションノードに ACK を送信する。

3.2 仮想無線 LAN デバイス内部の処理

ゲスト OS が無線 LAN デバイスとして認識可能な仮想デバイスを作成するには、デバイスドライバで想定された動作を模擬する必要がある。HiFE では、Linux 標準ドライバのうち、現時点で最新のものである backports-3.18.1-1 [29] を使用し、AR9160 向けドライバの ath9k ドライバが認識可能な仮想無線 LAN デバイスを実装する。仮想無線 LAN デバイスの主な処理には無線 LAN フレームの送信処理、および無線 LAN フレームの受信処理がある。さらに、無線 LAN フレームの送信処理はデータフレーム送信処理とビーコン送信処理に分けられる。図 5 に仮想無線 LAN デ

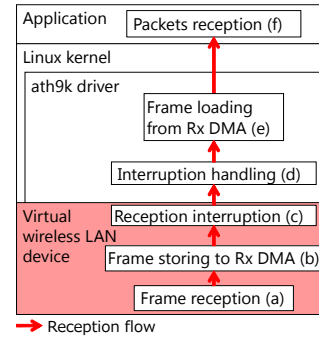


図 6 無線 LAN フレーム受信処理

バイスのフレーム送信手順を示す。本研究で実装した部分は Virtual wireless LAN device の部分である。データフレームの送信は図 5 に示した (A) から (G) の手順で行われる。

- (A) ゲスト OS のアプリケーションソフトウェアがパケットを送信する。パケットが Linux Kernel 内で無線 LAN フレームに格納され、ath9k ドライバに転送される。
- (B) ath9k ドライバが無線 LAN フレームを受け取り、仮想無線 LAN デバイスとの共有メモリである DMA 領域に無線 LAN フレームを格納する。
- (C) ath9k ドライバが仮想無線 LAN デバイスのレジスタに書き込みを行い、仮想無線 LAN デバイスに送信準備完了を伝達する。
- (D) 仮想無線 LAN デバイスが無線 LAN フレームを DMA 領域から取り出し、Scenargie に転送する。
- (E) 仮想無線 LAN デバイスが送信割り込みを生成する。
- (F) ath9k ドライバが送信割り込みを受け取る。
- (G) ath9k ドライバは、送信割り込み処理として、DMA 領域の初期化を行い、次の送信に備える。

ビーコンフレームの送信手順について説明する。ビーコンフレームの送信は ath9k ドライバが仮想無線 LAN デバイスをアドホックモード、またはアクセスポイントモードに切り替えたときに始まる。ath9k ドライバは仮想無線 LAN デバイスのモード切り替え時に、ビーコンを生成するためのタイマ割り込みインターバルをレジスタに書き込む。続いて、図 5 の (I) から (III) の手順でビーコンの送信が繰り返される。

- (I) 仮想無線 LAN デバイスは、レジスタに書き込まれたビーコン送信インターバルに従い、一定間隔でタイマ割り込みを生成する。
- (II) ath9k ドライバがタイマ割り込みを受け取る。
- (III) ath9k ドライバは、タイマ割り込み処理として、ビーコンフレームを生成する。図 5 の (B) からデータフレーム送信時と同様の処理を行い、ビーコンフレームを送信する。

図 6 に仮想無線 LAN デバイスのフレーム受信手順を示す。本研究で実装した部分は Virtual wireless LAN device

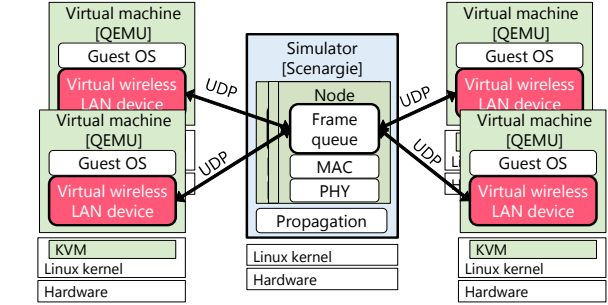


図 7 UDP を用いたネットワークシミュレータと仮想マシンの連携

表 2 TCP と UDP の比較

	利点	欠点
TCP	通信の信頼性	● ゲスト OS とホスト OS で TCP フレームが包含関係スループット低下の可能性 ● 再接続の必要性 (QEMU 脱着困難) ● フレームヘッダによるオーバーヘッドが大きい
UDP	コネクションレス型通信のため Scenargie と QEMU の再接続が容易	● 不正パケット受信による誤動作 ● 通信の信頼性

の部分である。無線 LAN フレームの受信処理は図 6 の (a) から (f) の手順で行われる。

- Scenargie が無線 LAN フレームを QEMU に転送する。仮想無線 LAN デバイスは QEMU の受信ハンドラを介して無線 LAN フレームを受け取る。
- 仮想無線 LAN デバイスは、無線 LAN フレームを DMA 領域に格納する。
- 仮想無線 LAN デバイスが、受信割り込みを生成する。
- ath9k ドライバは受信割り込みを受け取る。
- ath9k ドライバが受信割り込み処理として、DMA 領域から無線 LAN フレームを取り出す。
- ath9k ドライバは上位層のプロトコルに無線 LAN フレームを渡す。

3.3 Scenargie と QEMU の連携

Scenargie と QEMU 間では UDP を用いて無線 LAN フレームをやりとりする。HiFE の実運用時には、仮想マシンのスペックによっては計算量が多くなり、1 台のホストマシンでの評価が困難になることが予想される。そこで、ネットワーク経由で Scenargie と QEMU を連携させることで、図 7 の通り、仮想マシンを複数のホストマシンに分散させることを想定している。ネットワークを用いた Scenargie と QEMU の連携には、UDP 以外に TCP の利用も考えられるが、Scenargie と QEMU の脱着の容易さ、および通信速度を重視して UDP を使用した。UDP と TCP のそれぞれの特徴を表 2 に示す。Scenargie と QEMU の脱着の容易さとは、どちらかを停止しても再起動後には自動的に通信が再開されることを意味する。HiFE の実運用時には、シミュレーションシナリオの変更のために Scenargie を何

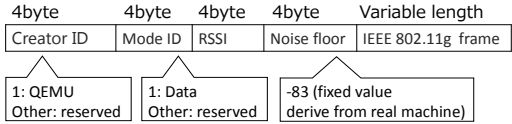


図 8 Scenargie, QEMU 間フレームフォーマット

表 3 HiFE がサポートできる機能、サポートが困難な機能

可能	困難・未確認
IEEE 802.11g を想定	暗号化通信
Station モードでの通信	仮想無線 LAN デバイスと Scenargie との送信電力同期
Ad-hoc モードでの通信	仮想無線 LAN デバイスと Scenargie とのチャネル設定同期
Access point モードでの通信	2 枚の NIC の利用
Monitor モードでの監視	
仮想無線 LAN デバイスへの RSSI, ノイズフロア反映	
実時間シミュレーション	

度も停止させたい場合や、ゲスト OS 内の設定を変更したために QEMU を何度も再起動させたい場合がある。コネクションレス型通信ではコネクションを張る必要がないため、Scenargie と QEMU のどちらかを再起動した場合でも、通信の再開が容易である。通信速度については、TCP を用いた場合、ホスト OS の TCP フレームがゲスト OS の TCP フレームを包む事によって輻輳制御の重複が生じるため、ホスト OS 上でのスループットが低下する懸念がある。また、ヘッダサイズのオーバーヘッドは UDP よりも TCP の方が大きいので、UDP を選択した。

Scenargie と QEMU は図 8 のデータをやりとりする。Scenargie と QEMU 間でやりとりが必要なデータには無線 LAN フレーム以外に、仮想無線 LAN デバイス制御命令、ネットワークシミュレータ制御命令、RSSI (Received Signal Strength Indicator), Noise floor 等が考えられる。現段階では、Scenargie から仮想無線 LAN デバイスに RSSI と Noise floor の値を反映可能である。RSSI の欄には電波伝搬シミュレーションから求めた RSSI を書き込み、Noise floor の欄にはあらかじめ実機 AR9160 から求めた Noise floor を固定値として書き込む。Creator ID や Mode ID には現段階では予約領域として常に同じ値を書き込んでいるが、将来はより多様なシミュレーション結果を転送可能にすることを目指している。

現時点で HiFE がサポートしている機能、サポートが困難な機能は表 3 の通りである。無線 LAN 通信として IEEE 802.11g の通信を模擬する。仮想無線 LAN デバイスは Station モード、Adhoc モード、Access point モード、Monitor モードに対応している。また、Scenargie から仮想無線 LAN デバイスに RSSI, および Noise Floor を反映可能である。シミュレーションは現時点では実時間で行うことを想定している。QEMU は実時間で動作し、Scenargie は 100ms の粒度で実時間に同期して動作する。

表 4 評価用端末のハードウェア構成

Product Name	Scenargie Comm Node
CPU	AMD Geode LX800 (500 MHz)
RAM	256 MB
Storage (Compact Flash)	16 GB
Wireless LAN	Atheros AR9160B, AR9106A (CSMA/CA) (IEEE 802.11g)
OS	Debian 7.5 i386
Wireless LAN driver	backports-3.18.1-1

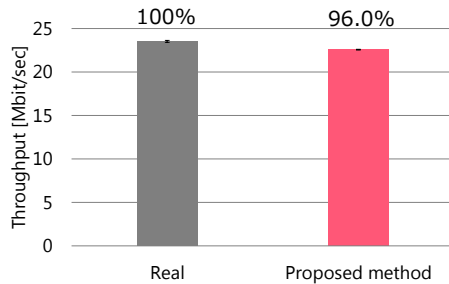


図 9 スループットの比較

4. 評価

4.1 評価環境

HiFE の実機動作に対する忠実度を確認するために、実機と HiFE のそれぞれで同じ評価環境を作成して評価結果を比較した。評価では、Iperf [30] による 2 ノード間 TCP 通信を行い、スループット、およびシーケンスナンバーの変化を測定した。ノード間距離は 5m とする。

実機、HiFE 固有の設定は下記の通りである。

(1) 実機 (Real)

実機の無線 LAN 端末として、Scenargie Comm Node [31] を使用した。Scenargie Comm Node のスペックは表 4 の通りである。電波干渉のない理想環境での測定を行うために、電波暗室で実験を行った。

(2) HiFE (Proposed method)

実機の評価環境を模擬するために、表 4 と等しいスペックの仮想マシンを作成した。ゲスト OS は実機からコピーしたものを使用した。Scenargie での電波伝搬シミュレーションでは Scenargie Dot Eleven Module [32] を使用した。また、送信動作を実機の AR9160 に近づけるために、送信レート制御のパラメータを static、変調方式のパラメータを 64QAM_0.75 に設定した。その他の値は Scenargie Dot Eleven Module のデフォルト値を使用した。

4.2 スループットの比較

実機動作に対する忠実度を評価するために、実機と HiFE のスループットを比較した。Iperf を用いて計測し、10 回の平均値を結果とした。

図 9 にスループットの評価結果を示す。縦軸がスループット [Mbit/sec]、横軸が各手法である。図 9 より、実

機、および HiFE のスループットの平均はそれぞれ 23.49 Mbit/sec, 22.55 Mbit/sec であり、HiFE が実機の 96.0% のスループットを達成していることがわかる。また、スループットの平均値の信頼区間は実機が 0.11, HiFE が 0.03 となっており、結果は常に図 9 と同様のものになるといえる。従って、HiFE により、実機の無線 LAN 通信を忠実に模擬できているといえる。

4.3 シーケンスナンバーの変化の比較

実機動作に対する忠実度をより精細なフレーム単位で評価するために、送信フレームのシーケンスナンバーの変化を比較した。4.2 節でスループットを計測した際に、Tshark [33] を用いてクライアント側 Iperf の送受信トラフィックを記録した。10 回のスループット測定時に記録したトラフィックのうち 1 回分を例に挙げ、送信パケットのシーケンスナンバーの変化を比較した。

時間あたりのシーケンスナンバーの変化を図 10 に示す。縦軸がシーケンスナンバー、横軸が送信開始からの経過時間 [sec] である。図 10 の右側には経過時間 9 秒からの拡大図を示している。図 10 より、以下の 2 つのことがわかる。1 つ目は、HiFE のシーケンスナンバーの変化が実機のものと同様である。フレーム単位で比較しても、HiFE が実機動作を忠実に模擬できているといえる。2 つ目は、図 10 の右側に示す通り、経過時間が増加すると少しずつシーケンスナンバーの変化に差が出ることである。原因を調べるため、Scenargie を経由せず仮想マシン間で直接通信した場合のスループットを計測した。仮想マシン間の直接通信では、実機での無線 LAN 通信以上のスループットを達成できた。以上の結果から、仮想無線 LAN デバイスは実機無線 LAN デバイスの通信能力を模擬可能であり、Scenargie の電波伝搬シミュレーションによってシーケンスナンバーの変化に差が出たと考えられる。実機の ath9k ドライバでは、変調方式として minstrel_ht という手法を使用している。一方、HiFE では、リアルタイム性が求められる変調を Scenargie 側で模擬している。Scenargie はバージョン 1.8 の時点で minstrel_ht の模擬に未対応であるため、64QAM_0.75 というパラメータを用いて実機に近いスループットを実現している。従って、変調方式のモデルを今後対応予定の minstrel_ht にすることで、より実機に則した評価結果が得られると考えられる。

5. 終わりに

本研究では、無線 LAN 通信評価における実機とネットワークシミュレータのトレードオフ関係である、端末台数の確保、場所の確保、伝搬伝搬の再現、および実機に忠実な動作の全てを実現する High Fidelity Emulation environment (HiFE) を提案した。HiFE では、ネットワークシミュレータの Scenargie の端末モデルとして仮想マシンの QEMU

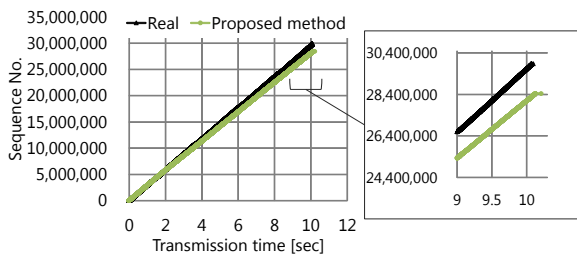


図 10 シーケンスナンバーの変化

を連携させることに加え、仮想無線 LAN デバイスを実装することで、無線 LAN 特有の機能や通信をハードウェアレベルで模擬可能にした。評価では、HiFE の実機忠実度を確認するために、2 ノード間 TCP 通信を行い、実機と HiFE のスループット、およびシーケンスナンバーの変化を比較した。評価の結果、HiFE は実機の 96.0% のスループットを達成していることがわかり、シーケンスナンバーの変化も実機に類似したことから、実機動作を忠実に模擬できることがわかった。今後は、他のシミュレーション手法やエミュレーション手法との比較を行う。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金 基盤研究 (B)「モバイルデータ 3D オフローディングの研究 (26280028)」により実施したものである。

参考文献

- [1] Aijaz, A., Aghvami, H. and Amani, M.: A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives, *Wireless Communications, IEEE*, Vol. 20, No. 2, pp. 104–112 (2013).
- [2] Levis, P., Lee, N., Welsh, M. and Culler, D.: TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications, *Proc. SenSys '03*, ACM, pp. 126–137 (2003).
- [3] Weingärtner, E., vom Lehn, H. and Wehrle, K.: Device Driver-enabled Wireless Network Emulation, *Proc. SIMUTools '11*, ICST, pp. 188–197 (2011).
- [4] Space-Time Engineering, LLC.: Scenargie, <https://www.spacetime-eng.com/en/products>.
- [5] QEMU, http://wiki.qemu.org/Main_Page.
- [6] Networks and Communication Systems Branch: EMANE, <http://www.nrl.navy.mil/itd/ncs/products/emane/>.
- [7] Ahrenholz, J., Danilov, C., Henderson, T. R. and Kim, J. H.: CORE: A real-time network emulator, *Proc. MILCOM '08*, IEEE, pp. 1–7 (2008).
- [8] Zhang, Y. and Li, W.: An Integrated Environment for Testing Mobile Ad-hoc Networks, *Proc. MobiHoc '02*, ACM, pp. 104–111 (2002).
- [9] Miyachi, T., Nakagawa, T., Chinen, K., Miwa, S. and Shinoda, Y.: StarBED and SpringOS Architectures and Their Performance, *Proc. TRIDENTCOM '11*, ICST, pp. 43–58 (2011).
- [10] Nakata, J., Uda, S., Beuran, R., Masui, K., Miyachi, T., Tan, Y., Chinen, K. and Shinoda, Y.: StarBED2: Testbed for Networked Sensing Systems, *Proc. INSS '07*, IEEE, pp. 142–145 (2007).
- [11] 国立研究開発法人 情報通信研究機構: StarBED³, <http://starbed.nict.go.jp/aboutus/index.html>.
- [12] Raychaudhuri, D., Seskar, I., Ott, M., Ganu, S., Ra-

- machandran, 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. WCNC '05*, IEEE, Vol. 3, pp. 1664–1669 (2005).
- [13] Rizzo, L.: DummyNet: A Simple Approach to the Evaluation of Network Protocols, *SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 27, No. 1, pp. 31–41 (1997).
- [14] Noble, B. D., Satyanarayanan, M., Nguyen, G. T. and Katz, R. H.: Trace-based Mobile Network Emulation, *Proc. SIGCOMM '97*, ACM, pp. 51–61 (1997).
- [15] Mano, H. and Saruwatari, S.: Implementation and Evaluation of a Wireless System Emulator, *IPSSJ Journal*, Vol. 55, No. 5, pp. 1541–1554 (2014).
- [16] Riverbed Technology: OPNET, <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/opnet.html>.
- [17] Varga, A. and Hornig, R.: An Overview of the OM-NeT++ Simulation Environment, *Proc. SIMUTools '08*, ICST, pp. 60:1–60:10 (2008).
- [18] NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [19] Zeng, X., Bagrodia, R. and Gerla, M.: GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks, *Proc. PADS '98*, IEEE, pp. 154–161 (1998).
- [20] SCALABLE Network Technologies: QualNet, <http://web.scalable-networks.com/content/qualnet>.
- [21] Barr, R., Haas, Z. J. and van Renesse, R.: JiST: An efficient approach to simulation using virtual machines, *Software: Practice and Experience*, Vol. 35, No. 6, pp. 539–576 (2005).
- [22] Krop, T., Bredel, M., Hollick, M. and Steinmetz, R.: JiST/MobNet: Combined Simulation, Emulation, and Real-world Testbed for Ad Hoc Networks, *Proc. WinTECH '07*, ACM, pp. 27–34 (2007).
- [23] SCALABLE Network Technologies: EXata, <http://web.scalable-networks.com/content/exata/>.
- [24] Staub, T., Gantenbein, R. and Braun, T.: VirtualMesh: An Emulation Framework for Wireless Mesh Networks in OMNeT++, *Proc. SIMUTools '09*, ICST, pp. 64:1–64:8 (2009).
- [25] Werthmann, T., Kaschub, M., Kühlewind, M., Scholz, S. and Wagner, D.: VMSimInt: A Network Simulation Tool Supporting Integration of Arbitrary Kernels and Applications, *Proc. SIMUTools '14*, ICST, pp. 56–65 (2014).
- [26] Henderson, T. R., Lacage, M. and Riley, G. F.: Network simulations with the ns-3 simulator, *Proc. SIGCOMM '08*, ACM, p. 527 (2008).
- [27] Barham, P., Dragovic, B., Fraser, K., Hand, S., Harris, T., Ho, A., Neugebauer, R., Pratt, I. and Warfield, A.: Xen and the Art of Virtualization, *SIGOPS Operating Systems Review*, Vol. 37, No. 5, pp. 164–177 (2003).
- [28] Qualcomm Atheros, Inc.: <http://www.qca.qualcomm.com/>.
- [29] Linux kernel backports, <http://drvbpl1.linux-foundation.org/~mcgrof/rel.html/backports/>.
- [30] Iperf, <http://iperf.sourceforge.net/>.
- [31] Space-Time Engineering, LLC.: Scenargie Comm Node, https://www.spacetime-eng.com/jp/products?page=Products_Scenargie_Comm_Node_jp.
- [32] Space-Time Engineering, LLC.: Scenargie Dot Eleven Module, https://www.spacetime-eng.com/jp/products?page=Products_Scenargie_Comm_Node_jp.
- [33] Tshark, <https://www.wireshark.org/>.