

# 次世代モバイルネットワークの光無線/ミリ波フロント/バックホールのためのハイブリッドアーキテクチャ及びクロスレイヤーデザイン

代表研究者

Anh T. PHAM

会津大学コンピュータ工学部門

教授

## 1 背景

モバイルインターネットとIoTの広範囲で開発に伴って、5Gモバイルネットワークは現在の4Gネットワークより1000倍システム容量や10倍スペクトル効率、エネルギー効率、データレートや25倍平均セルスループットを期待している。特に日本には、2020年の東京オリンピックで5Gモバイルに関する研究は2020年の展開目的に向かって産学双方から大きな注目を集めている。

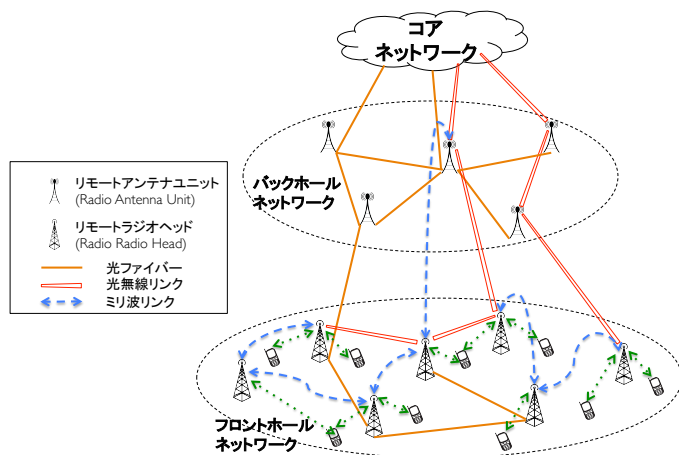


図 1: 提案されたハイブリッドF/BHネットワーク。

モバイルインターネットとIoTの広範囲で開発に伴って、5Gモバイルネットワークは現在の4Gネットワークより1000倍システム容量や10倍スペクトル効率、エネルギー効率、データレートや25倍平均セルスループットを期待している。特に日本には、2020年の東京オリンピックで5Gモバイルに関する研究は2020年の展開目的に向かって産学双方から大きな注目を集めている。

図1によりモバイルネットワークにおける、用語F/BHは一般にセル（基地局）とコアネットワークの接続性を示す。インターネットモバイルユーザーの増加及び超高速データサービスのため、次世代モバイルネットワークの必要な容量が大幅に増加するとみられる。次世代のF/BHで必然的な傾向は小さいセルの展開である（マクロ/マイクロセルからピコセルとフェムトセルまで）。従って、5GF/BHの小さいセル数がもっと大きくなっている。ですから、5GF/BHネットワークの最も重要な要件はコアネットワークへの高密度かつ大量のデバイスから巨大なトラフィックを転送できるようにすることである。5Gモバイルネットワークの大きな小さいセル数をサポートするように、ワイヤーF/BH（Optical Fiber-OFを用いて）から無線までの逆の傾向を促進している研究がたくさんある（3G/4Gにおける、傾向はBHネットワークでは広範囲でOFの展開と共にワイヤー技術への無線通信（Radio Frequency - RF）から移動することである）。その理由は無線BHの柔軟性高い及びエネルギー効率高いからである。さらに、ネットワーク規模は5GF/BHにおける重要な特徴であるから無線BHの高いコスト効率はその理由の一つである。RFより高帯域幅を提供する能力おかげで、逮捕者はミリ波技術である（割り当てられた無線スペクトルの9割はミリ波帯である）。

我々の観点により単一技術的解決策いづれかOF又はmmWは5GF/BHネットワークに十分ではない。OFは上位層の接続のための選択である。しかし、セル密度が高くなる時に無線ネットワークが望ましいである。一方、多数のセル及び必要な帯域幅のせいで無線ラジオシステムにおいて、信号干渉は重大な問題である。さらに、ミリ波は経路損失に多く悩まされ、気象状況に比較的敏感である「5」。それは5Gモバイルネットワークの重要な要件のQoE（User quality of Experience）を確保するためにF/BHネットワークに挑戦的な問題を課す。そのため、我々はF/BHネットワークのために有線OFと無線リンクのミリ波又は自由空間光通

信 (FSO) を利用するハイブリッドネットワークを提唱する。我々は OF、mmW、FSO 技術との組み合わせを用いて、F/BH のためのハイブリッドアーキテクチャ及びサブシステムのモデル化と評価を基礎的に研究することを特に注力する。

本研究は第 5 世代 (5G) モバイルネットワークのためのハイブリッドフロント/バックホールネットワークを提案する。提案されたネットワークは将来のクラウドベースモバイルインターネットとモノのインターネット (IoT) にコスト効率や拡張性や大容量通信等の利点を与えること期待する (図 1)。本提案の重要な独創は OF やラジオミリ波 (mmW) や FSO などの混合を用いるハイブリッドアーキテクチャである。このアーキテクチャは F/BH ネットワークに 5G の全ての条件を満たす可能性がある。具体的には、第一に、前述の全ての三つの技術は大容量需要をサポートする可能性がある。第二に、小さいセルの高密度における、FSO と mmW システムの組み合わせは様々な大気と気候状況でユーザの QoS を確保するためにネットワークの回復力を向上することができる。第三に、光通信技術の FSO のエネルギー効率及び費用対効果は無線のみ CRAN にスペクトラム希少性と干渉管理の問題を解決することができる。最後に、FSO を用いて OF ネットワークとの単純かつコスト効率シームレスな接続性を確保することができる。それは将来通信ネットワークのコアである。2 年間のプロジェクトでは、特に以下の研究課題に焦点を当てる。

- (1) まず、OF/mmW と FSO を用いたハイブリッドアーキテクチャの利点を確認することにより提案された F/ BH ネットワークの実現可能性を検証すること。
- (2) 次に、多様な物理チャネル状況下で様々な混合サブシステム (OF/mmW や FSO/mmW や FSO/FSO 等) に伴い、提案されたハイブリッドネットワークの理論的境界を研究すること。
- (3) 物理チャネル障害の影響下で信号処理及び符号化技術 (適応変調/符号化方式やネットワーク符号化やクロスレイヤ PHY/MAC プロトコルの設計と最適化等) の有効性を調査すること。

## 2 プロジェクトの主な成果

元の研究提案の 3 つの主な課題に基づいて、本プロジェクトの主な成果は 3 つある。

- (1) 提案されたハイブリッドネットワークのためのクロスレイヤ PHY/ MAC プロトコルの研究 [C4]。
- (2) F/BH 5G モバイルネットワークのための提案されたハイブリッドアーキテクチャ概念の開発 [C5]。
- (3) FSO 相関フェージングチャネルの基本的な限界 [J1、J2、J4、C3]。

さらに、このプロジェクトの成果で FSO ネットワーク上の量子鍵配送に関する研究方向を開始した [J3、C1、C2]。3 つの主な成果は以下のように記述される。

### 2-1 提案されたハイブリッドネットワークのためのクロスレイヤ PHY/ MAC プロトコルの研究 [C4]

最近の通信ネットワークにおける、高信頼性や可用性やスループットなど達成するために、FSO と RF の統合が導入されました。それは、FSO 及び RF が伝送媒体によって同じように影響されないという事実のため、論理的なアプローチである [12]。FSO リンクの主な劣化要因は霧と乱気流であるが、雨の影響はそれほど深刻ではない。それどころか、RF リンクは豪雨の影響を受けやすいが霧と乱気流の影響を受けない [13]。

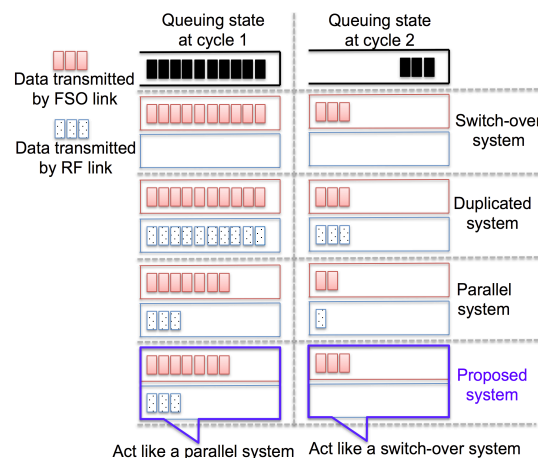


図 2: ハイブリッド FSO/RF システムの異なる操作の例。

従って、ハイブリッド FSO/RF は次世代モバイルネットワーク（5G）の F/BH のための高信頼性、高速データレート、高弾力性、高コスト効率のソリューションと考えられている [14]。

### (1) 関連研究

多くの既存のハイブリッドシステムでは、リンクの強度及び可用性に応じて2つのリンクのうちの1つのみがデータ送信のために使用される（すなわち、スイッチオーバーシステム）。一度に一つのリンクを使用すると、消費電力がより少なくなり、受信機でのデータの組み合わせ/並べ替えの使用を必要としない。このような操作は fSONA や MRV などのような市販のハイブリッド FSO/RF 製品に広範に採用されていた [15] - [17]。一方、データは複製され両方のリンクで同時に送信される。受信機における、(i) 2つのリンクからの信号はシンボルレベルで結合される（すなわち、複製/結合システム）[18]、又は (ii) 各リンクで受信されたデータストリームを独立的に検出した後、より信頼性の高いデータストリームのみが選択される（すなわち、複製/選択されたシステム）[19]。しかし、複製システムでは、チャンネル品質が悪い場合でも FSO と RF の両方のリンクが継続的にアクティブになる。それは送信電力の無駄と不要な干渉の発生につながる。並列システムという別の実装ではデータトラフィックはリンクの接続の品質に応じてそれらの間で分散され、従って、リソースのより大きな利用を同時に達成する。しかし、両方のリンクは常にアクティブになるのでかなりエネルギー量を無駄に消費する。さらに、その操作は送信機でパラレルリンクによるデータストリームの配信や受信機でデータの組み合わせ/並べ替えなどに関するシステムの複雑さが増す [20] - [22]。（図2に示すように、ハイブリッド FSO/RF システムの異なる操作の例）

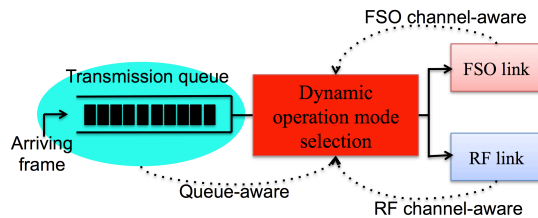


図3：ジョイント queue-aware・channel-aware に基づいたハイブリッド FSO/RF の新規操作。

### (2) 提案及び成果

上記の相談をきっかけに、ハイブリッド FSO/RF システムのための新規操作を提案する。それはチャンネル利用率、システムの複雑さ及びエネルギー効率の間のデザイントレードオフを達成することを目指すことである。スイッチオーバーとパラレルの2つの操作モードを検討する。さらに、オペレーションモード選択 (Operation Mode Selection-OMS) を担当する新たな機能を現在のハイブリッドシステムに追加する。キューとチャンネルの両方の状態を考慮して、（すなわち、queue-aware 及び channel-aware）送信機におけるインテリジェント制御の決定を行うことで動的 OMS ポリシーが提案される（図3）。我々の知る限りではそのような制御決定がハイブリッド FSO / RF システムで考慮されるのは初めてである。提案されたシステムの操作のイラストレーションは図2で見られる。最初の送信サイクルでは、送信機のキューに10フレームあり、フレーム数が十分に大きいので、より良いチャンネル利用のためにパラレルモードを選択することができる。第2の送信サイクルでは、3つのフレームしかないで、システムの操作を簡素化し、エネルギーを節約するた

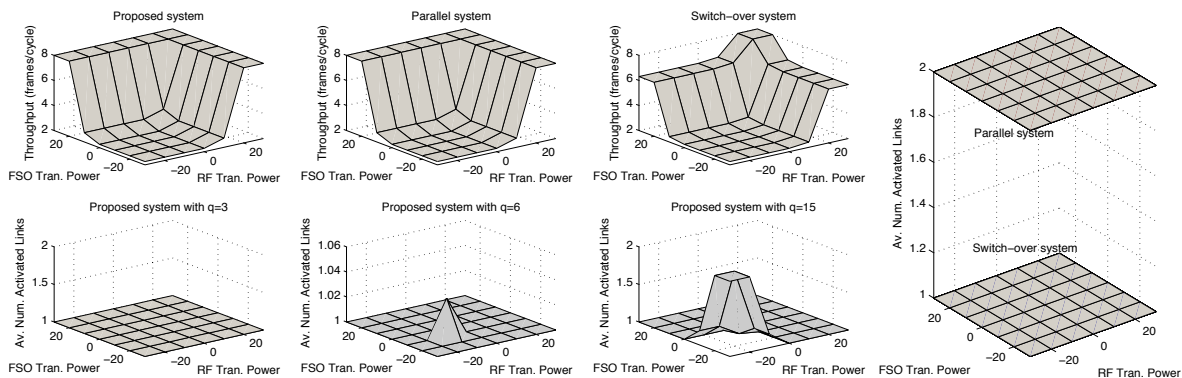


図4：様々なパフォーマンスメトリック対平均 FSO 送信電力  $P_f$  [dBm] および平均 RF 送信電力  $P_r$  [dBm]。

めにスイッチオーバーモードを選択することができる。Queue-aware・channel-aware とシステム操作モード選択の相互作用によりデザインだけでなく分析の問題も生じる。これらの相互作用を反映するために物理/リンクのクロスレイヤ分析を調査するための3次元(3D)マルコフ連鎖モデルが提案される(詳細は[4]にある)。このフレームワークにより、図4に示すように、平均スループットとアクティブリンクの平均数を含む2つの重要なパフォーマンスメトリックを分析することができる。これらの数値的結果は提案されたシステムの利点を検証する。

## 2-2 F/BH 5G モバイルネットワークのための提案されたハイブリッドアーキテクチャ概念の開発 [C5]

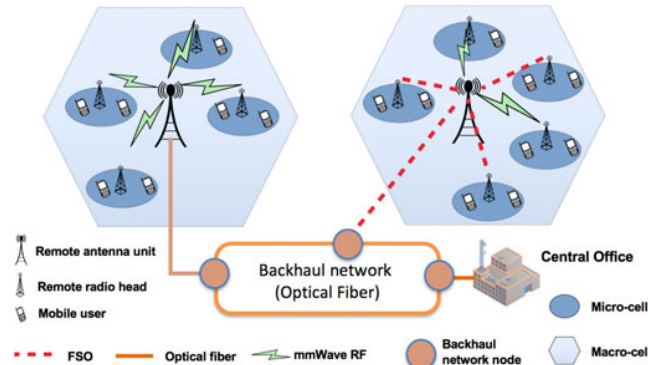


図5：バックホールネットワークのためのハイブリッドアーキテクチャ。(a) OF と mmWave RF を用いた標準的なバックホール接続 (b) FSO と mmWave RF を用いた接続の提案。

この研究は図5に示すようなハイブリッドF/BFアーキテクチャに焦点を当てる。5Gセルラーネットワークにおける、高コスト効率や高拡張性や大容量などのバックホールリングのために有線(OF)と無線(mmWave/FSO)の接続の利用が提案される。具体的には、図5(a)は複数のマイクロセルを有するマクロセルをバックホールネットワークに接続するためのmmWave RF及びOFの標準的な展開を示す。又は、図5(b)において例えばOFを展開することが不可能であるときにOFをFSOリンクに置き換える。さらに、FSOは大容量需要のマイクロセルへのリンク、及び/又は超高密度の場合のRF干渉の問題を緩和するためにも使える。このハイブリッドアーキテクチャではOF/FSO、OF/RF、FSO/FSO、RF/RF及びFSO/RFを含む様々なサブシステムタイプが研究され、それらのパフォーマンス分析が検討された([23、24]とその中の参照)。

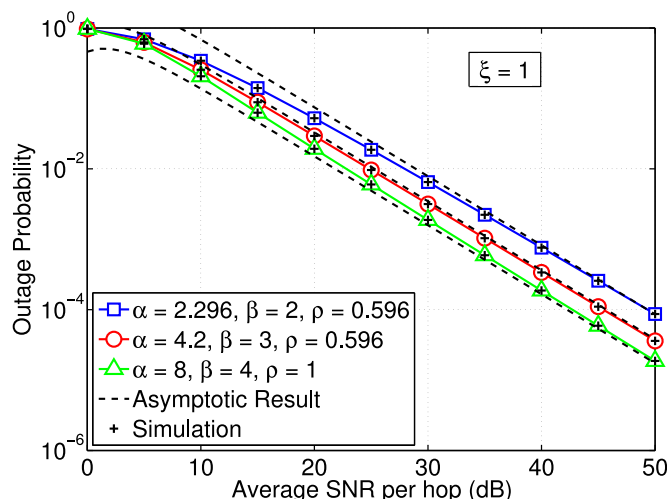


図6：異なる乱気流条件の下でのホッピング当たりの平均SNR対停止確率

我々の研究は、特に特にハイブリッドアーキテクチャにおける混合RF/FSOサブシステムに焦点を当てる。実祭、最近の論文[25-28]を含む混合RF/FSOシステムのパフォーマンスに関する多くの研究があった。特に、Zedini et al.はNagakami-mチャンネルとGamma-Gammaチャンネルによるヘテロダイン/直接検出を用いた混合RF/FSOシステムを検討した[25][28]。一般化されたM分布チャンネル(Generalized M-distributed

channel) がFSOのために仮定された混合RF / FSOシステムは、[26]及び[27]で調査された。それらの研究では古典的なレイリー (Rayleigh) チャネルがRFリンクに仮定された。しかし、視線 (light-of-sight -LOS) 成分の存在でmmWave 伝搬が評価する場合、ライスフェージングチャネル (Rician fading channel) がより適切なモデルである [29]。また、ライスフェージングモデルはレイリーフェーディング及び Nakagami-m フェーディングに縮小される [30]。したがって、本研究はブキャリア強度変調 (Subcarrier Intensity Modulation-SIM) /直接検出を用いた混合 mmWave RF/FSO システムのパフォーマンス分析のためにRFのライスフェージングとFSOのMalaga スフェージングモデルを使う。ライスモデルと同様に Malaga (M) はFSOの一般化されたフェージングモデルと見なすことができ、これは実験データに優れた適合性を提供し、対数正規やGamma-Gamma (G-G) やKや指数分布などを特別なケースとして使用する。さらに、高密度の都市部におけるFSOリンクの信頼性を決定するために、ポインティングエラーの影響も分析に含まれる。

本研究の成果は2つある。まず、Meijer's G関数で確率密度関数 (PDF)、累積分布関数 (CDF)、モーメント母関数 (MGF) の閉形式を新たに導出することである。これらの新しい結果に基づいて停止確率や平均ビット誤り率 (Average Bit Error Rate-ABER) 及び平均容量などを含む提案されたシステムの様々なパフォーマンスメトリックのための閉形式が導出される。さらに、Meijer's G関数の漸近展開に使うことによって単純な初等関数で高信号対雑音比 (Signal to noise ratio - SNR) の下での停止確率、MGF 及び ABER の漸近的な結果が提供される。次に、図6に示すように、提案されたシステムの様々なパフォーマンスメトリックが異なるチャネル条件の下で完全に議論される。乱気流とポインティングエラーの複合効果はシステム性能を著しく低下させ、mmWave RFリンクの品質はシステム全体で非常に重要であることがわかる。

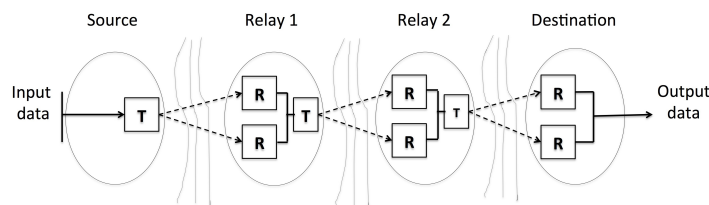


図7：2つの中継ノードと各ノードに2つの受信アパーチャを持つマルチホップSIMOシステム。

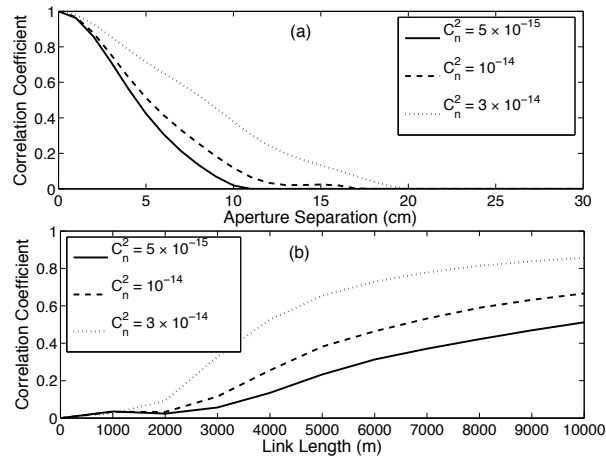


図8：(a) 乱気流強度の異なる値とリンク距離  $L=4000\text{m}$  で相関係数対アパーチャ分離；(b) 乱気流強度の異なる値とアパーチャ分離  $d=8\text{cm}$  で相関係数対リンク範囲。

### 2-3 FSO 相関フェージングチャネルの基本的な限界 [J1、J2、J4、C3]

FSO システムの主な課題の1つは、特にリンクの長さが1 kmを超える場合に、乱気流誘導フェージングの悪影響である。この問題に対処するために空間ダイバーシティ及びマルチホップ中継伝送を含む多くの技術が提案された。伝送経路をいくつかの短いホップに分割するマルチホップ中継伝送は距離に依存する乱気流強度と大気損失を緩和するだけでなく、LOS 要件も回避する。強度変調/直接検出 (Intensity

Modulation/Direct Detection - IM/DD) FSO システムのために、様々な中継戦略を有するマルチホップシステムのパフォーマンスが広く研究されていた。近年のデジタル信号処理の進歩により、IM/DD 方式に比べてパフォーマンスが大幅に向上したコヒーレント FSO システムが注目されていた [31]。コヒーレント FSO システムにおけるマルチホップ中継の採用は増幅転送 (amplify-and-forward: AF) [32][33] 及び復号転送 (decode-and-forward: DF) [34] の中継技術のために検討された。多数の中継を使うことでフェージングを大幅に緩和できることは明らかですが、これは費用対効果の高いソリューションではない。

一方、空間ダイバーシティは特に FSO 通信の分野における、より複雑ではなく経済的なソリューションを提供する。これは、空間領域における自由度を増加させ、したがって、フェージング分散を実質的に減少させる。空間ダイバーシティのパフォーマンスは、IM/DD 及びコヒーレント FSO システムの両方で広く研究されていた。しかし、サブチャネル間のフェージングが相関するとき、空間ダイバーシティの効率は減少する。図 8 は相関係数と (a) アパーチャ間隔 (b) リンクの長さの関係を示す。

本研究の目的なマルチホップコヒーレント FSO システムにおける相関フェージングチャネルの空間ダイバーシティの基本的な限界を調べることである。一般的な G-G フェージングモデルは、幅広い実用的な大気条件に適しているため使われる。特に、相関レベルが空間ダイバーシティの利点を定量的にどのように制限しているかを明確にし、FSO システムの特定のリンク範囲と大気条件に新しい中継の配備がいつ必要になるかを判断することを目指す。

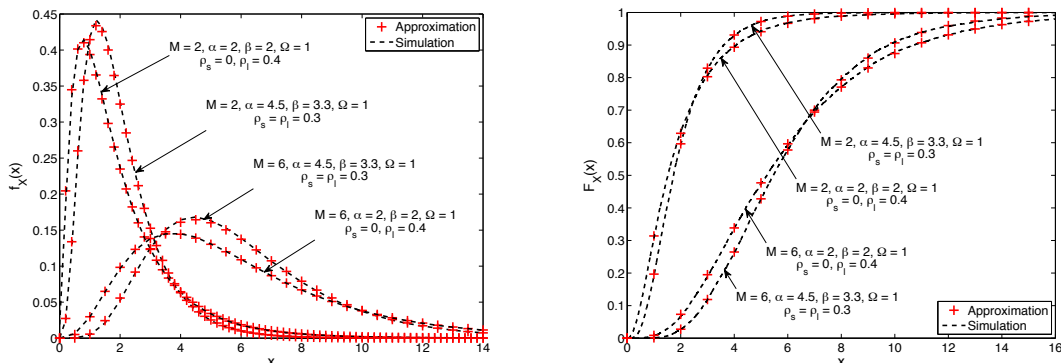


図 9: 相関 G-G RVs の和と近似 G-G RV のための PDF と CDF プロット

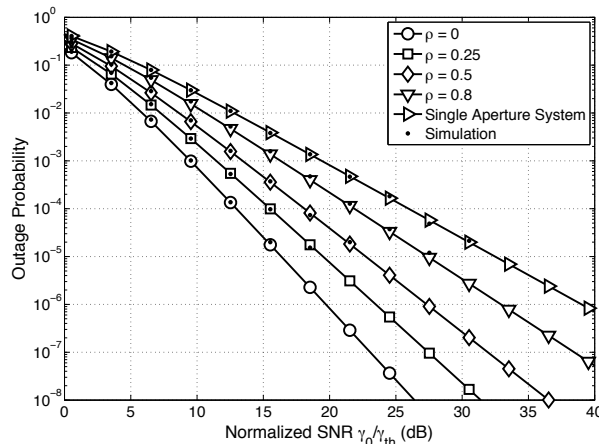


図 10: チャンネル相関の影響下で相関係数の異なる値によって正規化された SNR に対する停止確率。

### (1) 関連研究

複数の送信/受信アパーチャを用いることによって達成される空間ダイバーシティを有する FSO システムのパフォーマンスに関する以前の研究の大部分において、独立のフェージングチャネルが仮定された。相関フェージングについては、G-G チャネル上空間ダイバーシティを有する FSO システムのパフォーマンスは、チャンネル相関の単純化されたモデル (例えば、指数相関モデル [35][36]) を仮定して検討されていた。このモデルは、無線周波数 (RF) 通信から借用されており、FSO システムにおける大気乱流チャネルの特性を表すものではない。大気乱流誘発フェーディング相関に及ぼすチャンネル条件の影響を調べるために、最近いく

つかの研究が行われていた[37]-[39]。[37]と[38]では、波動光学とモンテカルロ (MC) シミュレーションを用いて、乱流強度やアパーチャ径やアパーチャ分離やリンク範囲などがチャネル相関に及ぼす影響が受信ダイバーシチ及び送信ダイバーシチシステムのために明らかにされていた。しかし、シミュレーション方法は具体例のみに絞っているため、得られた結果を一般的なケースに拡張することは困難である。この問題に対処するため、[39]の著者は上記のパラメータの関数として相関係数を提示した。この結果に基づいて、パラメータ化されたチャネル相関がFSOシステムの性能に及ぼす影響を調べるための分析的検討を実施する必要がある。したがって、この研究はこのギャップを埋めようとする。

## (2) 主な成果

本研究の成果は3つある。まず、マルチホップコヒーレントFSOシステムにおける相関G-Gフェージング下での空間ダイバーシチの基本性能限界を分析的に検討することである。第2に、対象システムのパフォーマンスを分析するために、相関G-G確率変数(Random variable - RV)の合計を正確に近似する方法を提案することである。具体的には、相関G-G RVの和は、単一のG-G RVとして近似され、そのパラメータは単純な閉形式で得られる。近似G-G RVをベンチマークとして使用して、システムパフォーマンスを分析する。近似法の精度は図9に示される。最後に、提案方法でリンクの範囲、乱気流の強さ、受信アパーチャの数、及びそれらの間の間隔がチャネル相関に及ぼす影響を考慮してDFとAF中継方式のための停止確率とエルゴード容量の閉形式を新たに導出すること。停止確率のパフォーマンスに対するチャネル相関の影響の一例を図10に示す。より詳細な分析は、[J1]及び[J2]に見出すことができる。

## 結論

本プロジェクトは、次世代(5G)モバイルネットワーク向けのハイブリッドF/BHの基本的な実現技術を研究する。それは将来のクラウドベースのモバイルインターネットとIoT(Internet of Things)の様々な展開条件のための高費用効果、高拡張性、大容量の接続性を提供することが期待される。以下のとおり、主な成果は3つある。

- (1) 0F/mmW及びFSOサブシステムの利点を確認して、ハイブリッドF/BHネットワークの実現可能性の調査
- (2) 様々の物理的チャネル条件下における0F/mmW、FSO/mmW、FSO/FSOなどの異なる混合伝送媒体を有するハイブリッドサブシステムの基本的限界に関する研究
- (3) クロスレイヤPHY/MACプロトコルのデザインとハイブリッドネットワークアーキテクチャの最適化に関する研究

このプロジェクトの成果は、多くの著名なジャーナル/トランザクション論文や国際会議で発表された。全体として、この2年間のプロジェクトの結果は、4件のジャーナルと5件の国際会議論文に掲載された。

## 【参考文献】

- [1] Docomo 5G white paper, "5G radio access: Requirements, concepts and technologies", NTT Docomo Inc, July 2014.
- [2] T. NAKAMURA et al. "5G Radio Access: Requirements, Concept and Experimental Trials". IEICE Tran. on Communications, Vol. E98-B No. 8, pp. 1397-1406. Aug. 2015.
- [3] L. Zhou et al. "Low Complexity Millimeter-Wave LOS-MIMO Systems with Uniform Circular Arrays for Small Cells Wireless Backhaul". IEICE Tran. on Communications. Vol.E98-B, No.11, pp. 2348-2358. Nov. 2015.
- [4] H. Peng et al. "LTE/WiGig RAN-Level Interworking Architecture for 5G Millimeter-Wave Heterogeneous Networks". IEICE Tran. on Communications. Vol.E98-B, No.10, pp. 1957-1968. Oct. 2015.
- [5] K. Tsukamoto, et al. "The Case for Free Space - Exploring the Prospect of Free-space Optical Links for Backhaul Applications-", IEEE Microwave Magazine, Vol. 10, No.5, pp. 84-92, August 2009.
- [6] P. T. Dat et al. - High-capacity wireless backhaul network using seamless convergence of radio- over-fiber and 90-GHz millimeter-wave, IEEE/OSA J. Lightw. Technol., 32 (2014) 3910-3923.

- [7] C. X. Wang et al., Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication network. *IEEE Commun. Mag.*, vol.52, no.2, pp.122–130, Feb. 2014.
- [8] Rangan, S et al., Millimeter-Wave Cellular Wireless Networks: Potentials and Challenges,” in *Proceedings of the IEEE*, vol.102, no.3, pp.366–385, March 2014.
- [9] Y. Li et al., “Resilient topology design for free space optical cellular backhaul networking,” *Proc. of the 2014 IEEE GLOBECOM-OWC*, pp.572–577, Dec. 2014.
- [10] J. E. Mitchell, “Integrated wireless backhaul over optical access networks,” *IEEE/OSA J. Lightw. Technol.*, vol.32, no.20, pp.3373–3382, Oct. 2014.
- [11] Anh T. Pham, Phuc V. Trinh, Vuong V. Mai, Ngoc T. Dang, Cong-Thang Truong. Hybrid Free-Space Optics/Millimeter-Wave Architecture for 5G Cellular Backhaul Networks. In *Proc. of the 20th Opto Electronics and Communications Conference (OECC2015)*. Shanghai, China, July 2015.
- [12] S. Milner and C. Davis, “Hybrid free space optical/rf networks for tactical operations,” in *Proc. IEEE MILCOM’04*, vol. 1, pp. 409–415 Vol. 1, Oct. 2004.
- [13] F. Nadeem, V. Kvicera, M. Awan, E. Leitgeb, S. Muhammad, and G. Kandus, “Weather effects on hybrid fso/rf communication link,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, pp. 1687–1697, Dec. 2009.
- [14] H. Dahrouj, A. Douik, F. Rayal, T. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Cost-effective hybrid rf/fso backhaul solution for next generation wireless systems,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, pp. 98–104, Oct. 2015.
- [15] I. Ansari, F. Yilmaz, and M.-S. Alouini, “On the performance of mixed rf/fso dual-hop transmission systems,” in *Proc. VTC Spring*, pp. 1–5, June 2013.
- [16] M. Usman, H.-C. Yang, and M.-S. Alouini, “Practical switching-based hybrid fso/rf transmission and its performance analysis,” *IEEE Photon. J.*, vol. 6, pp. 1–13, Oct. 2014.
- [17] V. V. Mai and A. T. Pham, “Adaptive multi-rate designs and analysis for hybrid fso/rf systems over fading channels,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98.B, pp. 1660–1671, Aug. 2015.
- [18] N. Chatzidiamantis, G. Karagiannidis, E. Kriezis, and M. Matthaiou, “Diversity combining in hybrid rf/fso systems with psk modulation,” in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1–6, June 2011.
- [19] S. Bloom and W. S. Hartley, “The last mile solution: Hybrid fso radio,” white paper, AirFiber Inc., 2002.
- [20] H. Tapse, D. Borah, and J. Perez-Ramirez, “Hybrid optical/rf channel performance analysis for turbo codes,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, pp. 1389–1399, May 2011.
- [21] J.Perez-Ramirez and D.Borah, “Design and analysis of bit selections in harq algorithm for hybrid fso/rf channels,” in *Proc. VTC Spring*, pp. 1–5, June 2013.
- [22] V. V. Mai and A. T. Pham, “Performance analysis of parallel free- space optics/millimeter-wave systems with adaptive rate under weather effects,” in *Proc. APCC*, pp. 193–198, Oct. 2015.
- [23] L. Yang, X. Gao, and M.-S. Alouini, “Performance analysis of relay-assisted all-optical FSO networks over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 23, pp. 4613–4619, Dec. 2014.
- [24] S. S. Soliman, V. C. M. Leung, N. C. Beaulieu, and J. Cheng, “Analysis of general dual-hop AF systems over Rician fading links,” in *Proc. IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, Dec. 2015, pp. 1–6.
- [25] E. Zedini, I. S. Ansari, M.-S. Alouini, “Performance analysis of mixed Nakagami-m and gamma-gamma dual-hop FSO transmission systems,” *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 1, Feb. 2015, Art. no. 7900120.
- [26] L. Yang, M. O. Hasna, and X. Gao, “Performance of mixed RF/FSO with variable gain over generalized atmospheric turbulence channels,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 9, pp. 1913–1924, Sep. 2015.
- [27] L.Kong,W.Xu,L.Hanzo,H.Zhang,andC.Zhao,“Performanceofafree-space-opticalrelay-assistedhybridRF/FSO system in generalized M -distributed channels,” *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 5, Oct. 2015, Art. no. 7903319.
- [28] E.Zedini,H.Soury,andM.-S.Alouini,“Ontheperformanceanalysisofdual-hopmixedFSO/RFsystems,”*IEEETrans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 5, pp. 3679–3689, 2016, doi 10.1109/TWC.2016.2524685.
- [29] M. K. Samimi and T. S. Rappaport, “28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels,” in *Proc. IEEE 83rd Veh. Technol. Conf.*, Nanjing, China, May 2016, pp. 1–6.
- [30] M.K.SimonandM.-S.Alouini,*DigitalCommunicationsoverFadingChannels*,Hoboken,NJ,USA:Wiley,2005.



- [31] G. Li, "Recent advances in coherent optical communication," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 1, pp. 279–307, Apr. 2009.
- [32] J. Park, E. Lee, C. Chae, and G. Yoon, "Outage probability analysis of coherent FSO amplify-and-forward relaying systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 11, pp. 1204–1207, Jun. 2015.
- [33] E. Zedini and M. Alouini, "On the performance of multihop heterodyne FSO systems with pointing errors," *IEEE Photon. J.*, vol. 7, no. 2, Article no. 790110, Apr. 2015.
- [34] S. Aghajanzadeh and M. Uysal, "Multi-hop coherent free-space optical communications over atmospheric turbulence channels," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 59, no. 6, pp. 1657–1663, Jun. 2011.
- [35] S. M. Navidpour, M. Uysal, and J. Li, "Analysis of coded wireless optical communications under correlated Gamma-Gamma channels," In *Proc. of IEEE 60th Vehicular Technology Conference (VTC2004-Fall)*, pp. 827–831, Sept. 2004.
- [36] K. P. Peppas, G. C. Alexandropoulos, C. K. Datsikas, and F. I. Lazarakis, "Multivariate gamma-gamma distribution with exponential correlation and its applications in radio frequency and optical wireless communications," *IET Microwaves Antennas Propag.*, vol. 5, no. 3, pp. 364–371, Feb. 2011.
- [37] G. Yang et al. "Performance evaluation of receive-diversity free-space optical communications over correlated Gamma-Gamma fading channels," *Applied Optics*, vol. 52, no. 24, pp. 5903–5911, Aug. 2013.
- [38] J. A. Anguita et al., "Spatial correlation and irradiance statistics in a multiple-beam terrestrial free-space optical communication link," *Appl. Opt.*, vol. 46, pp. 6561–6571, Sept. 2007.
- [39] Z. Chen, S. Yu, T. Wang, G. Wu, S. Wang, and W. Gu, "Channel correlation in aperture receiver diversity systems for free-space optical communication," *Journal of Optics*, vol. 14, no. 12, p. 125710, 2012.

### 〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
[J1] On the Average Achievable Rate of Spatial Diversity MIMO-FSO over Correlated Gamma-Gamma Fading Channels	IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking	2018
[J2] Free-Space Optical Systems over Correlated Atmospheric Fading Channels: Spatial Diversity or Multihop Relaying?	IEICE Trans. on Communications	2018年9月
[J3] Design and Security Analysis of Quantum Key Distribution Protocol over Free-Space Optics Using Dual-Threshold Direct-Detection Receiver	IEEE Access	2018年6月
[J4] Performance of APD-based Amplify-and-Forward Relaying FSO Systems over Atmospheric Turbulence Channels	IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	2016年7月
[C1] Design and Secrecy Performance of Novel Two-Way Free-Space QKD Protocol using Standard FSO Systems,	Proc. of the 2017 IEEE ICC'17, Paris, France.	2017年5月
[C2] Performance of Free-Space QKD Systems using SIM/BPSK and Dual-Threshold/Direct Detection.	Proc. of the 2016 IEEE GLOBECOM'16, WS-QCIT. Washington DC, USA.	2016年12月
[C3] On the Ergodic Capacity of MIMO Correlated Gamma-Gamma Fading Channels.	Proc. of the ATC 2016. Hanoi, Vietnam.	2016年10月
[C4] Joint Queue-Aware and Channel-Aware for A Novel Operation of Hybrid FSO/RF Systems	Proc. of the IEEE VTC2016-Fall, Montréal, Canada.	2016年9月
[C5] Two-Way All-Optical AF Relaying FSO Systems over Malaga (M) Channels with Pointing Errors.	Proc. of the IEEE ICC 2016, Kuala Lumpur, Malaysia.	2016年5月