

主論文の要約

論文題目 非地上系ネットワークを対象とした電波伝搬測定と国際標準電波伝搬モデルの構築
(Radiowave propagation measurements for non-terrestrial networks and construction of international standard radiowave propagation models)

氏名 表 英毅

論文内容の要約

Beyond 5G (Beyond 5th Generation Mobile communications system) 以降の移動通信システムでは、人口カバー率を超える広大なエリアのカバー、災害に強いネットワークの確立、垂直方向にもエリアを拡大する3次元セル構成の確立を実現する手段として、非地上系ネットワーク (NTN: Non-Terrestrial Network) の研究開発が進められている。NTNでは、衛星や成層圏プラットフォーム (HAPS: High Altitude Platform Station) などの上空に配置した無線局を用いて、垂直方向を含む広大なエリアをカバーした災害に強いネットワークの実現が期待されている。HAPSは、高度約20kmの成層圏に気球や飛行船、ソーラープレーンなどを配置して、それらの機体に搭載される無線局を用いて最大半径100kmの広大なエリアをカバーするNTNの一種であり、Beyond 5Gを実現する手法としてその実用化に高い期待が寄せられている。

HAPSを用いて通信エリアを構築するためには、HAPSと対象となる他の無線局の間の伝搬特性を正しく推定するための世界共通の電波伝搬モデルが必要不可欠となる。国際電気通信連合の無線通信部門 (ITU-R: International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) ではHAPS対応電波伝搬モデルの勧告として2012年1月にITU-R勧告P.1409-1を発行した。この勧告は世界共通の電波伝搬モデルである。しかし、一部の環境における電波伝搬損失の推定には対応しているが、その適用方法が明確ではなかった。また、HAPSの展開エリアは多岐にわたるが、ITU-R勧告P.1409-1では市街地

や郊外におけるクラッター損失，屋外から屋内へ電波が侵入する場合の屋内侵入損失，植生による電波伝搬損失（植生損失），人体遮蔽損失には対応していないため，これらの環境における電波伝搬損失を考慮することができない。

そこで，本研究では，第一の目的として HAPS で想定される上記 4 つの電波伝搬環境に対する電波伝搬特性の解明を行う。併せてこれらの電波伝搬環境における電波伝搬モデルの開発を行う。

第一の目的を実現するために，著者はヘリコプター等の模擬成層圏環境や実際の成層圏環境からの電波伝搬損失特性を複数のエリアで実施し，植生による電波伝搬損失に対する電波伝搬モデルの対象エリアの拡張，市街地や郊外地における地物によるクラッター損失に対する電波伝搬モデルの開発，屋外から屋内へ電波が侵入する場合の屋内侵入損失に対する電波伝搬モデルの開発および高仰角に対応した人体遮蔽損失に対する電波伝搬モデルの開発を実施した。

著者が開発した電波伝搬モデルの一部は，ITU-R の傘下で電波伝搬を扱う研究委員会（SG3: Study Group 3）での国際標準化活動を実施する過程で，HAPS だけではなく，衛星などの他の NTN にも適用できる可能性が示された。これに伴い，ITU-R 参加各国から著者が提案したモデルが HAPS に対応した周波数や環境以外にも適用可能か評価するよう要請を受けた。これを受け，著者は，一部の特性について HAPS を対象として開発した電波伝搬モデルを他の NTN へも適用できるように拡張を図ることを第二の目的とし，新たな環境で追加測定を実施して，新たなクラッター損失モデルとサイトスペシフィックな屋内侵入損失モデルを開発した。

本論文の 1 章では，本研究の背景として NTN, HAPS, そして HAPS 対応電波伝搬モデルの開発と国際標準化が必要な背景について述べる。さらに，HAPS 対応電波伝搬モデルの国際標準化の過程で開発した電波伝搬モデルの一部が，HAPS だけでなく他の NTN にも適用できるよう拡張するに至った経緯を述べる。

2 章では，HAPS に必要な電波伝搬特性と電波伝搬モデルについて述べる。

3 章では，HAPS 対応電波伝搬モデルの解明について述べる。また，著者が開発した各環境における電波伝搬モデルについて述べる。

まず，クラッター損失については 3.1 節で成層圏環境を含む様々な環境における 0.7,1.5,3.3,5.7GHz を用いた測定結果に基づき，既存のモデルでは適用範囲外である 10GHz 以下の周波数に対応し，見通し率と遮蔽建物高を考慮した新しいクラッター損失モデルを開発した。この成果により，既存の勧告や先行研究では対応していない HAPS の高度と HAPS のサービスリンク向け周波数に対して，干渉検討に向けた伝搬推定を行うことが可能となる。

屋内侵入損失については 3.2 節でシステムデザイン用電波伝搬モデルとして，より詳細なパラメータに対応した屋外から屋内へのサイトスペシフィックな屋内侵入損失モデルを作成するために電波伝搬測定を実施し，その解析結果から，仰角や屋内侵入距離に加えて，屋

内の部屋の横幅や、屋内で透過する壁の枚数も電波伝搬損失に影響を与えることを特定した。これらの成果により、詳細な計算が必要となる「システムデザイン用電波伝搬モデル」として4章に記載した屋内侵入損失モデルの開発が可能となる。

植生損失については3.3節にて、異なるエリア、異なる季節で電波伝搬測定を実施してITU-R 勧告 P.833-9 を基に新たな植生損失モデルを開発した。このモデルはITU-R 勧告 P.833-9 には定義されていない季節も特定して推定を行うことができる。この成果により、既存勧告や先行研究では対応していない、異なる地域に対して同一の関数（推定式）で季節を考慮した植生損失の推定が可能となる。

人体遮蔽損失については3.4節にて、まず、人体を模擬したファントムを用いて、到来パスが一つである場合の基本的な人体遮蔽損失を測定した。基本的な人体遮蔽損失は、主にLOS 環境等が対象となる。次に、都市部や住宅地などのマルチパスがある環境を対象とした人体遮蔽損失モデルを開発するために、実環境において電波の垂直及び水平方向の到来角度特性を測定した。この測定結果を基本的な人体遮蔽損失と重畳することで、マルチパスがある場合の人体遮蔽損失モデルを開発した。これらの成果により、先行研究では対応していない上空からのパスに対する人体遮蔽損失と人体周辺の環境に応じて様々な方向から到来するマルチパスに対応した人体遮蔽損失を推定することが可能となる。

4章では、HAPS だけではなく他のNTN への適用を目的として3章で示した電波伝搬モデルの拡張について述べる。

4.1節では3.1節のクラッター損失モデルを拡張する。10GHz 以下を対象としたHAPS 対応クラッター損失モデルを10GHz 以上へも拡張することを目的として、29.3GHz での追加測定を実施するとともに、地上局高が遮蔽建物高よりも低い場合から高い場合まで含めた環境における追加測定を実施し、HAPS 以外のNTN に対応した新たなモデルを開発した。この成果により、既存勧告では考慮していない都市構造を考慮することで、既存勧告より高精度にHAPS だけではなく他のNTN の干渉検討に向けたクラッター損失推定を行うことが可能となる。

4.2節では3.2節の屋内侵入損失を拡張する。29.3GHz で実施した新たな測定結果を解析し、HAPS だけではなく他のNTN へも対応し、詳細なエリア設計にも適用できる新たなサイトスペシフィックモデルを開発した。このモデルは、上空からのパスだけではなく地上からのパスにも適用できる。この成果により、既存勧告や先行研究では対応していない屋内侵入損失に影響を与えるすべてのパラメータに対応した詳細な屋内侵入損失推定が可能となる。

5章では、本論文の総括と今後の展望について述べる。本論文では、HAPS で想定される電波伝搬環境に対する新たな電波伝搬モデルを開発し、干渉検討用のHAPS 対応電波伝搬モデルをITU-R において国際標準化した。開発したモデルの一部はITU-R からの要請を受けて、HAPS だけではなく他のNTN へも適用できるように拡張した。今後、拡張した電波伝搬モデルがITU-R で国際標準化されればNTN 全般に対して統一されたモデルで干渉

検討が可能になることから、これらの技術を用いたサービスの普及に大きな貢献となる。

また、本研究で開発した電波伝搬モデルの一部は干渉検討用だけでなくシステムデザイン用としても使用することができる。これらのシステムデザイン用電波伝搬モデルの一部は、世界に先駆けて国際標準化を達成している。システムデザイン用電波伝搬モデルは、詳細なパラメータを基に環境に応じた電波伝搬損失特性を計算できることから、詳細な地図情報を有するエリア設計システムに実装することで HAPS やその他 NTN のエリア設計への貢献が期待できる。

さらに、電波伝搬モデルは新たな無線技術を評価するための役割も担っている。Beyond 5G 以降の移動通信ネットワークでは、日々 HAPS やその他 NTN を対象とした新たな無線技術が研究開発されている。本研究で開発した電波伝搬モデルは適用環境に応じてこれらの新たな無線技術を評価するための基準となり得る。

以上に述べたように、本研究では HAPS のサービスリンク向け周波数に対応した各電波伝搬環境における電波伝搬モデルを開発した。また、開発した電波伝搬モデルの一部を他の NTN にも対応できるように発展させた。これらの成果は、単に学術的な成果だけではなく、国際標準として ITU-R 勧告に採用された。国際標準化活動としては、具体的には HAPS 対応電波伝搬モデルの ITU-R 勧告 P.1409-1 の改訂に向けた活動を実施した。著者は、ITU-R 勧告 P.1409-1 に既に含まれている電波伝搬環境と含まれていない電波伝搬環境を整理して、含まれている電波伝搬環境に対してはその適用方法を明確化すると共に、含まれていない環境に対しては著者が開発した各環境における電波伝搬モデルを ITU-R 勧告 P.1409-1 及びその関連勧告に追加・改訂するための国際標準化活動を実施し、干渉検討用電波伝搬モデルの国際標準化を達成した。本成果は、ITU-R 勧告 P.1409-2 として発行された。

この国際標準化の達成は、HAPS の事業展開を目指す世界の事業者にとって大きな一歩である。具体的には、HAPS の商用化を目指している世界各国の事業者は、この電波伝搬モデルを活用することで、電波干渉の影響などを踏まえ、既存の無線通信システムとの周波数の共用・共存の検討や、HAPS を活用した無線通信システムの設計を効果的に行うことができるようになった。この国際標準化の経緯は ITU-R の構成とともに本論文の Appendix にまとめている。