



異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発

株式会社KDDI総合研究所 **しんぼ 新保** **ひろゆき 宏之**



1. はじめに

第5世代移動通信システム（5Gシステム）では、ITU-R IMT-2020^[1]において「大容量、多接続、高信頼／低遅延」というユースケースが示されている。今後、Beyond 5Gや6Gに向けて通信サービスがユーザセントリック^[2]になり、更なる伸びが予想されるトラフィックを収容するには、周波数帯域幅の確保が必要になる。そのひとつの方法として、高い周波数の開拓がある。ミリ波帯はITU-RのWRC-19で5Gシステム向けに利用する周波数が17.25GHz幅で特定されており、昨今はテラヘルツ波帯の検討も行われている。他方、既存の周波数で、時間的、地理的に利用されていない周波数帯域を活用する、周波数共用を行う方法も考えられる。周波数共用を行わない場合は、新たな無線システムを導入するにあたり、周波数再編等により、周波数帯を確保する必要がある。異なる無線システム間で周波数共用を実現できれば、共用側となる5Gシステム向けに周波数を確保できただけでなく、既存無線システムへの影響が少なく、早期に周波数全体の利用効率化が可能になる。

本稿では、2019年度から2020年度にかけて実施した、総務省の委託研究「異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発」において検討を行った、動的な周波数共用である「ダイナミック周波数共用」を高度化する上で必要になる要素技術の概要と、その適用について紹介する。

2. 要素技術の概要

異システム間で動的な周波数共用を高度に実現するには、大きく分けて次の①から③の技術が必要となる。ダイナミック共用の研究開発で、①から③についての高度化として取り組んだ全体像を図1に示す。

・①空間軸での空き周波数リソースの探知技術

静的かつ平面での離隔距離による従来の周波数共用とは異なり、高さ方向、すなわち地形や建物を考慮するサイトスペシフィックで、当該周波数が利用されていない場所（空き周波数リソース）の精緻な探知が必要となる。

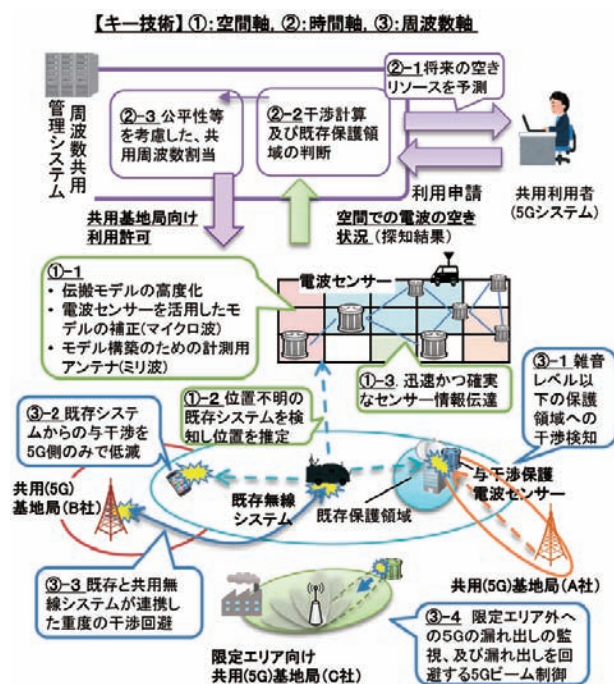
・②時間軸での管理技術

共用される周波数帯は、周波数共用管理システムで割当てや干渉発生時の停波指示等の管理がされる。このために

必要となる、干渉計算の高度化等による空き周波数リソースの高精度な把握と、共用される周波数を多数の利用者で活用するための利用者間での公平な割当てを実現した。

・③共用周波数の利用技術

共用周波数を活用するため、利用できる場所の拡大に向けて、既存無線システム及び5Gシステムを近づける必要がある。このために、干渉発生低減もしくは回避を実現する技術や、限定エリア内でのみ割当てを受けた電波を利用する技術を確認した。



■図1. ダイナミック周波数許可技術の概要

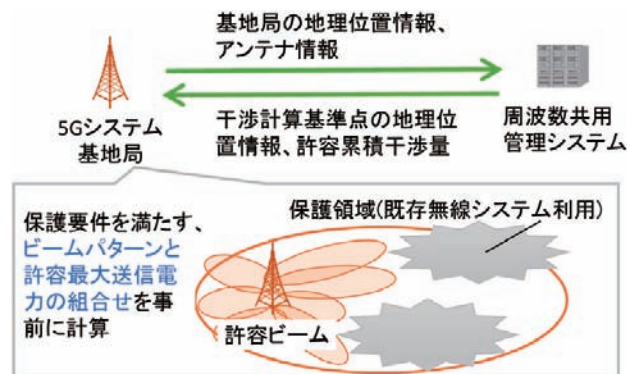
①探知技術について、技術の根幹となるのは、周波数共用に適した電波伝搬モデルである。一般的に用いられている拡張秦式のような電波伝搬状態を表すことを目的としたモデルとは異なり、周波数共用向けのモデルは、5Gシステムから既存無線システムを保護するように推定する、すなわち、実測値より過少に推定しないことが求められる。他方、あまりにも電波伝搬を過大に推定すると、既存無線システムを保護すべき領域が大きくなり、周波数共用の活用範囲が狭まるため、バランスが必要になる。電波伝搬モデルの検討



は、電波伝搬特性が異なることから、マイクロ波とミリ波で分けて検討した。マイクロ波では、ITU-R P.2108をベースとした伝搬モデル自体のサイトスペシフィックでの高度化を行った^[3]。また、更なる高度化として、電波センサー等による実観測データを基に深層学習を活用して、構造物の建物情報から直接観測できない遠方の電波伝搬を推定する手法を検証した^[4]。ミリ波は、直進性が高いことからマイクロ波と反射や回折の特性が異なり、さらにビームフォーミング等の技術も導入される。これに対応するため、既存無線システム及び5Gシステムの3次元設置位置、アンテナビーム方向や幅、送信電力が既知という条件で、誤検出による与干渉の発生を避けるために、伝搬損失の下限となる最小伝搬損失を推定するモデルを確立した。また、更なる高度化に向けて、車等で容易に面的な測定が可能なアンテナ^[5]等を用いた、実際の電波の計測を基に、既存無線システムの送信パラメータの推定を行い、屋根越え回折を考慮した伝搬モデルで推定を行う、ハイブリッドセンシング手法を確立した^[6]。

周波数共用で電波の伝搬範囲を前述したモデルで把握するには、送信局の位置情報が重要になる。しかし、既存無線システムの種別によっては、送信局が移動する、もしくは送信局の位置情報が開示されないケースがある。周波数共用の適用が可能となる無線システムを拡大するため、送信位置が不明な既存無線システムに対し、電力重心を用いて、送信局の位置を推定する手法を確立した^[7]。この入力となる、広範囲の電波センサーで得られた情報の迅速、かつ確実に伝達する方式を確立した^[8]。

②管理技術では、周波数共用での肝となる、空き周波数リソースの判定を行う、既存無線システムに関する干渉計算や保護領域の判断の高度化を行った。干渉計算では、最大で数万程度の多数の送信局を対象に、送信局の位置やアンテナパターン等の諸元を考慮し、①探知技術で述べたモデルで電波伝搬の計算を行い、その結果に基づき、保護領域を判断する。保護領域は、5Gシステムが既存無線システムに重大な干渉の影響を与える範囲であることから、高信頼に判断される必要があるが、必要最低限にしないと、稠密かつ高効率な周波数共用が困難となる。さらに、干渉計算では多数の計算が行われるが、計算に時間を要すると、周波数共用の利用申請から許可までに時間を要することになり、共用周波数の利用効率が低下する。このために、送信局の位置情報の粒度、アンテナやビームフォーミングのパターン等を考慮し、高信頼、必要最低限の保護領域で、高速に計算が行える手法を確立した^[9]。その適用例は図2のようになり、5Gシ

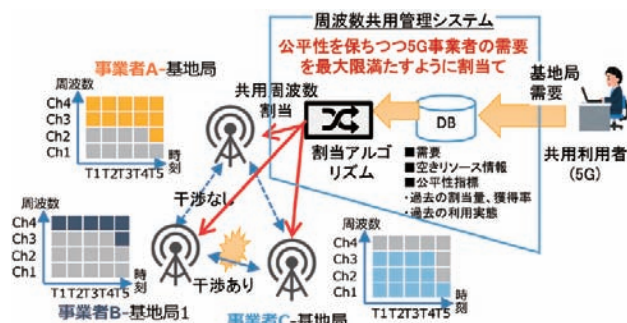


■図2. ダイナミック共用に適した干渉計算手法の実用例

ステムの時間的な共用周波数の利用範囲の拡大に貢献可能となる。

また、共用対象となる周波数帯を計画的に利用するためには、将来の時間方向での空き周波数リソースが生じる場所や時間帯の把握が必要となる。しかし、共用周波数帯の利用状況は、場所ごとに時々刻々と変化する。将来の空き周波数リソースを推定するため、実測した当該共用周波数帯の受信電力の情報に基づき、ランダムフォレストによる機械学習で推測する手法を確立した^[10]。さらに、ローカル5Gのように共用周波数帯が多数の利用者で活用されることを想定し、利用者間等の公平性と、周波数利用効率を両立した割当手法を確立した^[11]。本手法は、図3に示すように、離れており干渉を生じず、かつ需要差が少ない基地局群を仮想基地局として一括して扱うことで、組み合わせ最適化問題で課題となる計算量の削減を可能としている。

③利用技術では、共用周波数を利用できる場所の拡大や、割当てを受けた共用周波数帯を最大限に活用するための検討を行った。既存無線システムと5Gシステムを近づけても、干渉を低減する、もしくは回避することで、無線システム間の離隔距離を縮小させることができ、利用できる場所の拡大につながる。このための既存無線システムからの与干渉の低



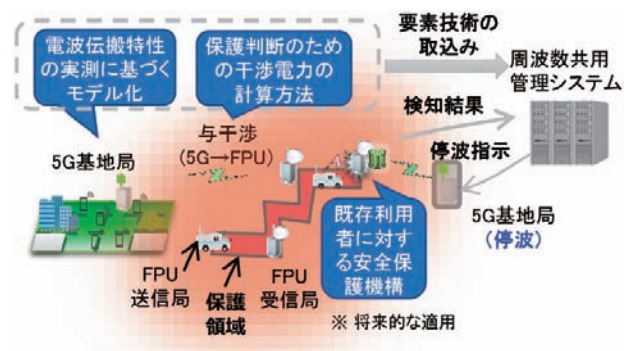
■図3. 共用周波数の公平な割当手法



減では、5Gシステム側のみで低減する技術を検討した。既存無線システムと5Gシステムの無線信号の仕様が異なり、非同期に信号を送信することから、既存の干渉低減方式で対応ができない。これに対応するため、共通の受信信号を同期や復号の際にそれぞれのシステムに合わせて変換し、干渉信号を推定・除去する手法を考案した^[12]。また、重度な干渉の回避のために、その予兆となる、周波数共用条件となる保護基準レベルでの無線システムの検知手法を確立した。加えて、既存無線システムと5Gシステムの連携に用いるための低消費電力かつ長距離の無線通信方式^[13]や、5Gシステムの帯域外輻射を抑制することで干渉の回避を図る方式を検討した。さらに、割当てを受けた共用周波数を、限定範囲内で最大限に利用することで、有効活用を図る必要がある。このために、ミリ波帯でのローカル5Gシステムを想定し、ビームフォーミング伝送における、基地局配置や限定エリア内外の遮蔽物や反射などの影響を考慮した、ビームごとに干渉電力を把握し送信電力を制御する方式を確立した^[14]。

3. 要素技術の適用

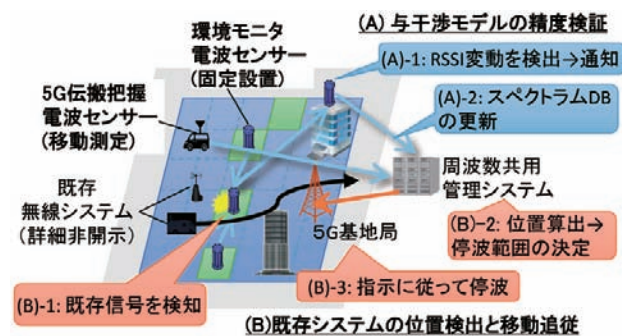
前述した研究開発で得られた要素技術は、直近の社会実装と、将来の周波数共用の更なる高度化への適用に向けて取組みを行っている。直近の社会実装については、2.3GHz帯の放送事業用FPU (Field Pickup Unit) との周波数共用の検討を行った。周波数共用の実現には、図4に示すような要素技術だけでなく、周波数共用管理システム、共用条件や法制度、運用フローの検討、共用条件の検討のための電波伝搬データの取得や運用フローのフィールドでの実証が必要になる。これらに関する取組みを、研究開発と総務省技術試験事務「移動通信システムと他の無線システムとのダイナミックな周波数共用に関する調査検討」と連携して進めることで、早期の社会実装を目指した。この結果、放送事



■図4. 2.3GHz帯FPUへの社会実装での適用イメージ

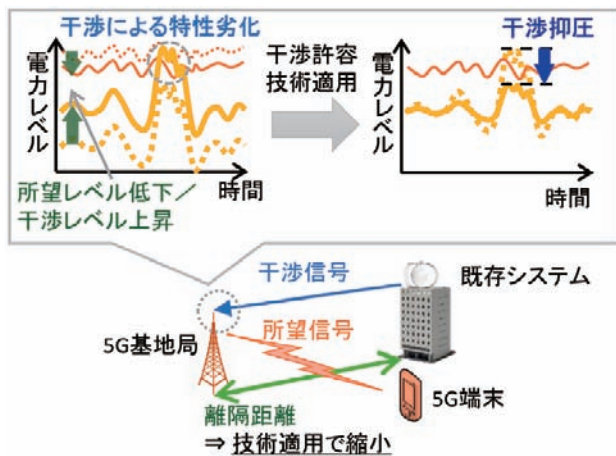
業者や携帯電話事業者等の関係者の合意を得た形で、共用条件を含む報告書^[15]が作成された。現在、2021年度内の実用化を目指して、電波法関係規程の整備が進められている。同様の検討は26GHz帯でも行われ、電波伝搬モデルや5Gシステムの利用状況を加味した保護判断を行う干渉計算手法の取込みを行う形で、FWA事業者や携帯電話事業者等のステークホルダーの合意を得た上で、調査検討報告書に盛り込まれた。

また、2025年頃を見据えた将来の周波数共用の更なる高度化では、共用対象の周波数帯や無線システムといった適用範囲の拡大を目指した、実用化シナリオを検討した。検討したシナリオ例をいくつか紹介する。①探知技術では、図5のように電波センサーを活用することで、空き周波数リソース探知精度の向上が実現される。これにより、さらに空き周波数リソースの確保が可能となり、ダイナミック周波数共用の適用の範囲が拡大すると考えられる。また、②管理技術では、図2のような送信局の位置、送信電力、アンテナの方向やビームフォーミング等の諸元を考慮した、ダイナミック共用に適した干渉計算手法の適用、多数の周波数共用利用者を想定した図3の公平な周波数割当技術が考えられる。③利用技術のうち、共用周波数の重度干渉回避技術を適用することで、図6に示すように既存と共用システムの連携による干渉回避が可能になる。共用周波数の干渉許容技術と合わせて、無線システム間の離隔距離の縮小が実現され、実現され、周波数利用効率の改善を図れる。これらの実用化シナリオは、既存無線システムや5Gシステムの適用状況によって、組み合わせて利用することも考えられる。今後、得られた要素技術及びその組合せによって、空き周波数リソース、すなわち共用可能な周波数の空間的、時間的な利用機会の拡大を図り、周波数利用効率の向上を、ダイナミック周波数共用の高度化を通じて図っていく。



RSSI: Received Signal Strength Indicator

■図5. 電波センサーによる空き周波数リソース探知精度の向上



■図6. 共用周波数の重度干渉回避技術の適用例

謝辞

本研究は、総務省「異システム間の周波数共用技術の高度化に関する研究開発」(JPJ000254)における受託研究の一環として実施されたものである。また、当該委託研究は、電気通信大学、東京工業大学、信州大学、日本電業工作、ソニーグループ、京都大学、パナソニック、KDDI総合研究所により共同で実施している。本稿は、KDDI総合研究所が研究開発の内容を代表として述べたものである。

【2021年5月26日 情報通信研究会より】

参考文献

- [1] ITU-R, Monte Carlo simulation methodology for the use in sharing and compatibility studies between different radio services or systems, Report ITU-R SM.2028-2, 2017.
- [2] KDDI, KDDI総合研究所, KDDI Accurate 5.0, https://www.kddi-research.jp/kddi_accelerate5_0/
- [3] 宮本 直, 片桐 啓太, 佐藤 光哉, 安達 宏一, 藤井 威生, “周波数共用のためのアンテナ高差および支配的パスを考慮したクラッタ損失改良型電波伝搬推定,” 信学技報, vol. 120, no. 238, SR2020-39, pp. 108-113, Nov 2020.
- [4] K. Suto, S. Bannai, K. Sato, K. Inage, K. Adachi and T. Fujii, “Image-driven spatial interpolation with deep learning for radio map construction,” in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 6, pp. 1222-1226, June 2021.
- [5] 東 右一郎, 工藤 友章, “六角形放射素子の整合回路を備えた円偏波導波管スロットアレーアンテナの試作特性,” 2020電子情報通信学会 ソサエティ大会, B-17-25, pp.311, Sep.2020.
- [6] P. Hanpinitak, K. Murakami, K. Saito, J. Takada, “Angle-of-Arrival-based Outdoor Localization for Spectrum Sharing at 25 GHz Band,” in Proc. 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Jan 2021. J. Takada, K. Saito and P. Hanpinitak, “A Kirchhoff Approximation based Spectrum Availability Prediction Method at Millimeter Wave,” 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, pp. 1-2, DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135707, 2020.
- [7] Hiromi Matsuno, Yoshio Kunisawa, Takahiro Hayashi, “Location Estimation Algorithm for Multiple Wave Sources Using Power Gravity Points, WPMC2020, Oct. 2020.
- [8] 末廣太貴, 小林強志, 田久修, 不破泰, “イベント検出のための無線センサネットワークにおけるセンサ情報の効率的な収集方法の実機実験,” 信学技報, SR2021-22, pp. 16-21, 2021年7月
- [9] H. Kuriki, K. Onose, R. Kimura and R. Sawai, “Area-based Primary Protection with Antenna Rotation Prediction for Dynamic Spectrum Access,” in Proc. 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020), B3-4, pp. 1-4, Dec. 2020.
- [10] Tatsuya Nagao, Takahiro Hayashi, Yoshiaki Amano, “Comparison of the long-term forecasting method of RSSI by machine learning,” IEICE Communications Express, Dec. 2020.
- [11] Akio Ikami, Takahiro Hayashi, Yoshiaki Amano, “Interoperator Channel Management for Dynamic Spectrum Allocation between Different Radio Systems,” IEICE Communications Express, Nov. 2020.
- [12] Ryochi Kataoka, Issei Kanno, Toshinori Suzuki, Hiroyasu Ishikawa, Kosuke Yamazaki and Yoji Kishi, “Evaluation of Asynchronous Successive Interference Cancellation for 5G in Shared Spectrum with Different Radio Systems,” 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020), C1-1, Dec. 2020.
- [13] Ruiting Ouyang, Takeshi Matsumura, Keiichi Mizutani, and Hiroshi Harada, “Channel Modeling Algorithm for TVWS-based IEEE 802.22 WRAN System in Rural Areas,” IEEE VTC 2020-Fall, pp. 1-5 (2020年11月18日)
- [14] 長谷川 嶺, 守内 祐三, 志水 紀之, 安永 毅, 金本 英樹, “周波数共用のための空間情報に基づくビームフォーミングゲイン制御,” 信学技報, vol. 120, no. 238, SR2020-26, pp. 22-28, Nov. 2020.
- [15] 総務省, 「新世代モバイル通信システムの技術的条件」のうち「2.3GHz帯における移動通信システムの技術的条件」, https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000502.html, 2021.