

# 広帯域離散 OFDM 技術における適応変調制御方式の基本性能評価

新保 宏之<sup>1,a)</sup> 菅野 一生<sup>1</sup> 高草木 恵二<sup>1</sup>

移動体通信におけるデータトラフィック量は増加しており、それらを収容するには新たな周波数資源が必要となる。しかし、移動体通信に適した無線伝搬特性を有する 1GHz 以下のような低い周波数帯では周波数資源が逼迫しており、新たにまとまった帯域幅の割当をすることは困難である。ところが、低い周波数帯でも既存割当の隙間や時間・場所で利用されていない「空き周波数帯域」が離散的に存在しており、これが活用できれば新たな周波数資源を確保するのと同等の意味となる。筆者らは、離散的な空き周波数帯域を束ねて、広帯域の移動体でのデータ通信を実現する「広帯域離散 OFDM 技術」の研究を進めている。本稿では、広帯域離散 OFDM 技術の概要と、通信品質のうち、スループット性能を左右する適応変調制御方式について計算機シミュレーションで基本的な評価を行った結果を述べる。

## 1. はじめに

近年、移動体通信におけるデータトラフィック量は増加傾向にあり、その傾向は今後も継続すると見込まれている。例えば、[1]では 2018 年の移動体データトラフィック量が 2013 年と比較して 11 倍になると想定されている。

このような移動体通信でのデータトラフィックを収容するためには、周波数資源を効率的に利用し、データ通信容量の確保を図る必要がある。そのひとつの方法として、周波数 1Hz あたりに送信可能なデータ量を増大させる方法がある。しかし、この方法には物理的な限界があり、データ通信容量を確実に確保するためには、新たな周波数資源の開拓が必要となる。

新たな周波数資源として、テラヘルツ波といった高い周波数帯が着目されている。しかし、高い周波数帯は、その物理的特性から距離による減衰が大きく、移動しながら通信することが前提の移動体通信には適さない。そこで、筆者らは、距離による減衰が小さく、移動体通信に適した低い周波数帯、具体的には 1GHz 以下の周波数帯に着目している。

しかし、1GHz 以下の周波数帯は、移動体通信やテレビ等の他の無線を利用するシステム向けに割当が行われており、新たに広い周波数帯域を移動体通信向けに確保することは困難である。ところが、1GHz 以下の周波数帯にも、次のような「空き周波数帯域」が存在している：(a) 既存で割当されている周波数帯の間に存在する隙間の周波数帯域 (b) 周波数帯はある無線システムに割当られているが、ある時間や場所によっては利用されていない周波数帯域。空き周波数帯域の存在を確認するため、日本国内のいくつかの地点で 100MHz から 1GHz における周波数の利用状況を調査した [2]。この結果、ひとつひとつの帯域幅は狭いが、観測対象の広い周波数帯に散在した空き周波数帯域が存在し、その合計の周波数帯幅は最大 290MHz であることを把握した。もちろん、このような空き周波数帯域は、周波数割当状況、時間、場所によって変化するものであるが、

何らかの形では存在していることになる。このような幅広い周波数に散在する空き周波数帯域を、他の無線システムによる周波数の利用状況を勘案しつつ、動的に束ねて移動体通信向けに利用することが実現できれば、新たに周波数資源を確保するのと同等の意味を有している。

筆者らは、前述したような、幅広い周波数帯に散在した空き周波数帯域を動的に束ねて、広帯域の移動体でのデータ通信を実現可能な広帯域離散 OFDM (WNC-OFDM: Wideband Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技術の実現に向けた研究を進めている[3]。WNC-OFDM 技術の実現には、無線回路の実現、被干渉対策、与干渉対策等の多数の技術的な課題が存在する。これらの課題のうち、本稿では送信するユーザデータを無線品質の状態に応じて送信する変調方式や符号化率の決定を行う適応変調制御について着目する。適応変調制御により無線での通信品質を担保することから、制御方式はスループット等の性能を左右する重要な要素である。既存の LTE (Long Term Evolution) といった移動体通信システムは基本的には 1 個の周波数帯を対象に適応変調制御を実施する。しかし、WNC-OFDM 技術では、数 100MHz から 1GHz の周波数帯域幅に散在する、ひとつひとつは細かい帯域幅の空き周波数帯域を活用するために、多数の周波数帯を同時に利用することから、その方式について、既存の移動体通信システムとは異なる方式が必要となると考えられる。

本稿では、まず 2 で既存研究や類似技術、実現に向けた技術的課題を含めた WNC-OFDM 技術について述べる。その後、3 で検討した適応変調制御方式及び計算機シミュレーションによる評価を行った結果を示す。最後に 4 でまとめを行う。

## 2. WNC-OFDM 技術

### 2.1 概要

WNC-OFDM 技術は、幅広い周波数に散在する空き周波数帯域を束ねて利用することで、広帯域の移動体でのデータ通信を実現するための技術である。このために、図 1 のように送信側でデータ通信トラフィックを、無線リンクでの送信単位である OFDM サブキャリア単位で空き周波数帯

1 株式会社国際電気通信基礎技術研究所  
適応コミュニケーション研究所  
〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2  
a) shinbo@atr.jp

域に割当を行う。割当された OFDM サブキャリアはそれぞれの周波数で送信が行われ、受信側では分散された OFDM サブキャリアを全て受信し、元のデータ通信トラフィックを復調する。なお、図 1 に示すように、空き周波数帯域はその定義から既存で割当を受けている無線システム信号の間に存在する形となる。さらに、空き周波数帯域の位置や他の無線システム信号の状況は、場所や時間等によって動的に変化することになる。

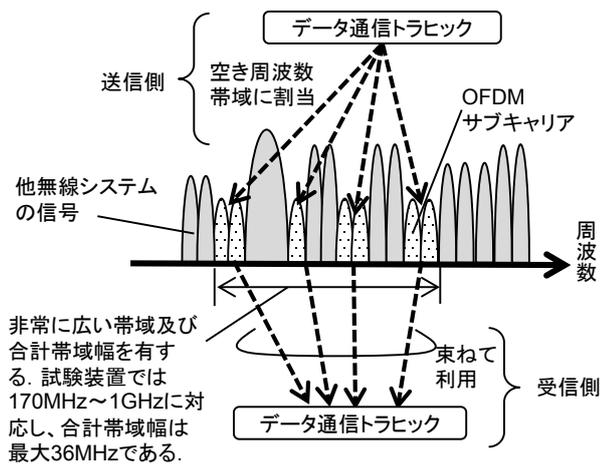


図 1 WNC-OFDM 技術の概要

WNC-OFDM 技術の評価用に、2.3 で述べる技術的課題を解決した試験装置を作成した(図 2)。本装置は、LTE Rel.8 [4] ベースの無線レイヤの方式、例えば OFDM サブキャリア配置を採用している。周波数帯としては 170MHz から 1GHz の 830MHz 幅をサポートしており、このうち任意の周波数帯の合計 36MHz の周波数帯域幅をデータ通信に利用することが可能である。今後、フィールド実験により、WNC-OFDM 技術を実環境で用いることが可能かを確認する予定である。

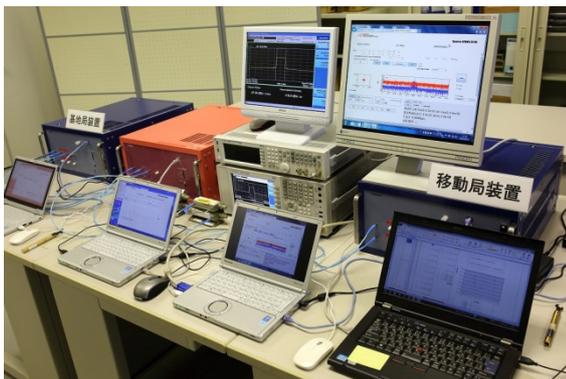


図 2 WNC-OFDM 試験装置

## 2.2 既存研究及び類似技術

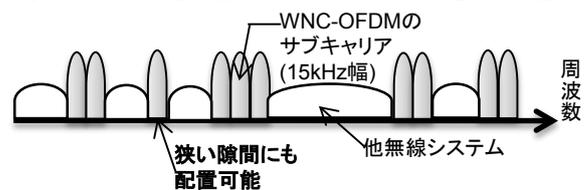
散在する周波数帯域を束ねて利用する技術に関する既存研究として、NC-OFDM (Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技術が検討されている [5,6,7]. NC-OFDM 技術も、WNC-OFDM 技術と同様に、

OFDM サブキャリアを離散した周波数帯に対して割当を行う技術である。これまでの研究に基づく実装 [7] では、ある周波数(5GHz 帯)の連続する周波数帯域幅 30MHz の中で OFDM サブキャリアの離散的な配置が実現されている。しかし、現在着目している低い周波数帯、特に 1GHz 以下において、連続する 30MHz の周波数帯域幅内で十分な空き周波数帯域を確保し、今後必要になる広帯域の移動体でのデータ通信を実現することは困難である。この問題を解決するため、WNC-OFDM 技術ではより広い周波数帯域幅(現在の試験装置では 830MHz 幅)に対応することで、広帯域の通信を実現するために十分な量の空き周波数帯域の確保を目指している。

また、複数の周波数帯を束ねて利用する類似技術として、既存の LTE システムに対し、キャリアアグリゲーション (CA: Carrier Aggregation) 技術 [8] が通信事業者で導入されつつある。CA では、あらかじめ定められている周波数帯の組に対して、無線リンクを束ねて利用することが可能である。これに対し、WNC-OFDM 技術では幅広い周波数帯域幅の中で任意に利用する周波数帯を変更し、束ねられることが大きく異なる(図 3)。また、束ねることが可能な最小の周波数帯域幅に着目すると、CA では 180kHz であるのに対し、WNC-OFDM 技術では OFDM サブサブキャリア単位、すなわち 15kHz となる。束ねられる単位が小さいということは、狭い隙間に存在する空き周波数帯域を活用可能であることを意味している。広い周波数帯に散在する空き周波数を極限まで活用するという観点では WNC-OFDM 技術がより適していると考えられる。

### WNC-OFDM技術

周波数軸上の任意の場所にOFDMサブキャリアを配置可能



### キャリアアグリゲーション(CA)技術

あらかじめCA可能な周波数帯を定義。さらに、配置する単位もWNC-OFDM技術より大きい



図 3 WNC-OFDM 技術と CA 技術の比較

## 2.3 実用化に向けた主な課題

### 2.3.1 装置実装

WNC-OFDM 技術による無線通信装置を実装する上で一番の課題は、無線部分の送受信回路(RF-Unit: Radio Frequency Unit)をどのように実装するかである。理想的に

は広い周波数帯域幅をひとつの RF-Unit で全てカバーすれば、柔軟に OFDM サブキャリアを配置することが可能のため、空き周波数帯域を効率的に利用することが可能である。しかし、要求される信号処理速度、送信電力、低ノイズといった技術面に加え、装置の大きさやコスト面からこの方法は現実的ではない。この問題を解決するため、周波数帯域幅の小さい複数の RF-Unit に分割し、それぞれがサポートしている周波数帯域のある領域を担当するという形で実装を行った(図 4, [3])。

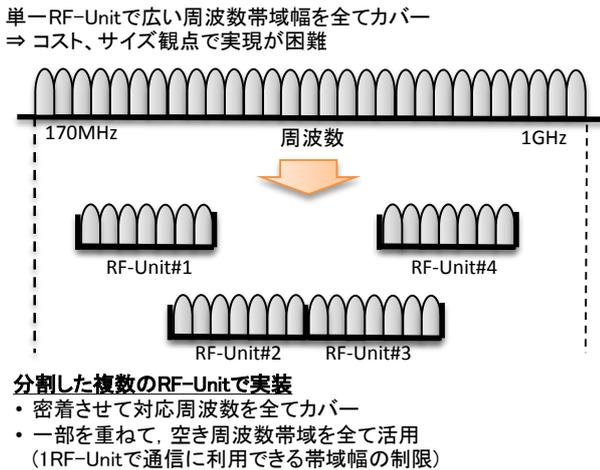


図 4 複数 RF-Unit による実装イメージ

WNC-OFDM 技術の試作装置では 1 個が 122.88MHz 幅をサポートする、4 個の RF-Unit で装置を構成している。各 RF-Unit は 170MHz から 1GHz の間で任意に配置することが可能である。図 5 に試作装置の基地局、端末の RF-Unit 回路を示す。

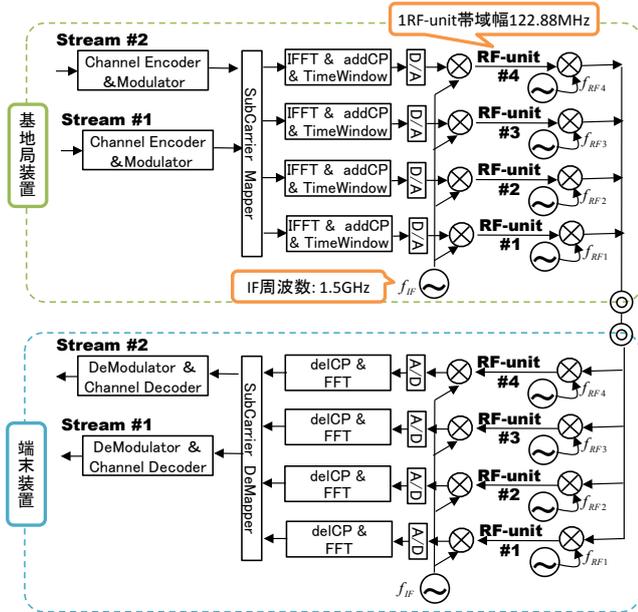


図 5 試作装置の RF-Unit 回路図

### 2.3.2 与干渉及び被干渉対策

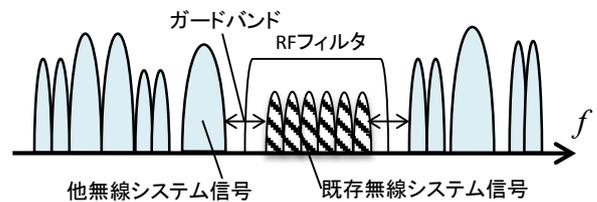
ある無線システムが電波を発射した場合、他の無線シス

テムの電波と干渉し、スループット等の性能への影響を及ぼす。このとき、自無線システムが他無線システムに与える影響を与干渉、その逆を被干渉と呼んでいる。無線システムにおいて、自分だけでなく他者も含めて、通信性能への影響を避けるために、与干渉及び被干渉は可能な限り低減する必要がある。干渉自体は一般的に発生することであり、これまでの LTE 等の既存無線システムでは、利用する周波数帯域を保護するため、隣接する無線システムとの間にガードバンドと呼ばれる緩衝領域を設ける、アナログ的な無線レベルのフィルタ(RF フィルタ)を利用することで与干渉及び被干渉対策を行っている(図 6(a))。

WNC-OFDM 技術で空き周波数帯域を活用する場合、図 1 のように隣接する無線システムは周波数的に近い場所にあることから、与干渉及び被干渉対策はより重要であるが、前述の手法は用いることが難しい。その理由としては、ひとつひとつの空き周波数帯域の幅は非常に狭いことから、ガードバンドを設けてしまうと通信に利用できる周波数帯域幅が狭くなってしまふことが挙げられる。また、広い周波数に散在し、かつ動的に変化する空き周波数帯域に追従して干渉を抑制可能な RF フィルタを実現することが困難であることも理由のひとつである(図 6(b))。

#### (a) 既存無線システム

RFフィルタ及びガードバンドで被干渉や与干渉影響を抑制



#### (b) WNC-OFDMシステム

干渉抑制のためのRFフィルタ及びガードバンドの適用が困難

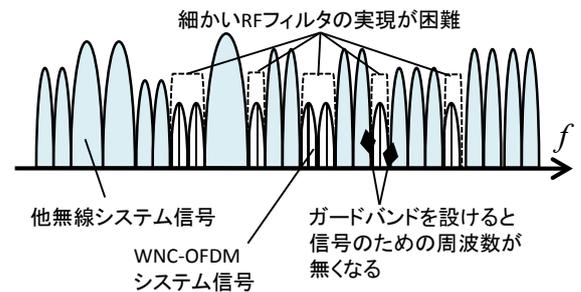


図 6 与干渉及び被干渉対策

この問題を解決するため、RF-Unit のデジタル信号処理による与干渉及び被干渉対策を行う手法を WNC-OFDM 技術では導入している、具体的な手法としては、与干渉対策として窓関数、被干渉対策として白色化フィルタ技術等があり、一部は試作装置を用いた評価を行っている [3]。

### 3. WNC-OFDM 技術での適応変調制御方式

#### 3.1 適応変調制御方式

移動体通信システムでは、端末が移動することにより、伝搬減衰やドップラー周波数等の無線品質が刻々と変化する。無線品質が悪いのに、ある無線フレームで一度に大量のデータを送信しようとするとエラーが発生し、通信品質が低下する。通信品質を確保するためには、無線品質に応じて、一度に送信するデータ量を適切に決定しなくてはならない。この決定を行う部分が「適応変調制御」である。図7は、一般的なLTEシステムの下りリンク(基地局から端末方向)の適応変調制御の処理イメージを示している。まず端末は定期的を上りリンク(端末から基地局方向)で無線品質情報(CQI: Channel Quality Indicator)を利用する周波数帯に関して通知する。基地局はCQIを元に、無線フレームで一度に送信するデータ量を定義する、変調方式と符号化率の組み合わせであるMCS (Modulation and Coding Scheme)を、通信品質が一定になるようにテーブルから決定し、ユーザデータを載せた無線フレームを端末に送信する。端末がCQIを通知してから、基地局がMCSを決定し無線フレームを送信するまでには、数msの「制御遅延」が発生する。制御遅延には、①CQI通知のために上りリンクで情報を送信するのに要する時間、②基地局でCQIからMCSを決定する処理や無線フレームの構築や送信処理を行う時間、③決定したMCSで無線フレームを送信する時間が含まれている。

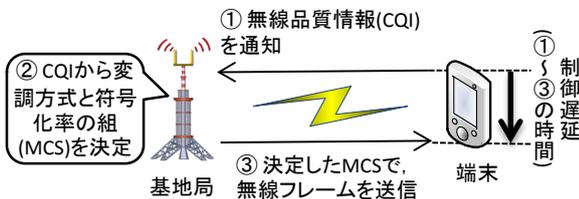


図7 適応変調制御の処理イメージ

WNC-OFDM 技術の試験装置は、LTE システムの標準仕様である3GPP Rel.8 ベースで実装されているため、CQIの取得や上りリンクでの通知、MCS決定後の無線フレーム送信の仕組みがLTEシステムと同様の方法となっている。しかし、基本的には1個の周波数帯を同時に利用するLTEシステムと異なり、幅広い周波数帯を同時に利用するWNC-OFDM 技術では、周波数帯毎に異なる無線品質に対してどのように適応変調を行うか、すなわちMCSを決定する制御方式の検討が必要となる。加えて、適応変調の検討においては、上りリンクでのCQIの通知量がスループット等の下りリンクでの通信性能に与える影響を考慮する必要がある。無線品質は周波数帯毎に異なるため、CQIは周波数帯毎に通知され、利用する周波数帯が増えれば総量が増加し、通知に時間を要することになる。これにより、端末がCQIを通知した時点の無線品質と、基地局で実際に割

り当てを行った無線品質のずれで通信性能への影響が発生する(図8)。しかし、現状でCQI通知に関する詳細は未検討であるため、本稿では通知量の増加による通信性能への影響を、単純に通知時間の増加、すなわち制御遅延の増加とし、CQIで通知された無線品質を割り当てで利用するタイミングがずれた影響という形で検討する。なお、CQI通知時点と割り当て時点の無線品質のずれについては、端末の移動速度に応じて発生するため、合わせて通信性能への影響を評価する形となる。

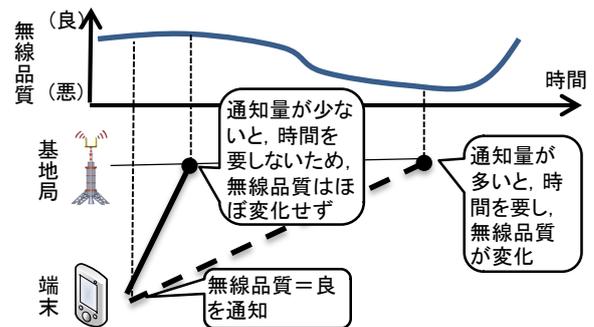


図8 CQI通知量による影響

WNC-OFDM 技術向けの適応変調制御方式として、図9に示す2種類の方式を検討している。

- Independent Mapping (IndMap)
 

周波数帯による無線品質変動に応じた適応変調を個別に行う方式である。制御としては、無線品質が良いバンドにはMCSを高く割り当て(=より多くのデータが一度に送信できる)、無線品質の悪い周波数帯にはMCSを低く割り当てることになる。
- Diversity Mapping (DivMap)
 

周波数帯間の無線品質差を活用し、周波数ダイバーシティを得るため、あるデータに対し、誤り訂正符号を施して冗長化し、送信に複数の周波数帯を同時に利用する方式である。これにより、複数周波数帯で一括したMCS

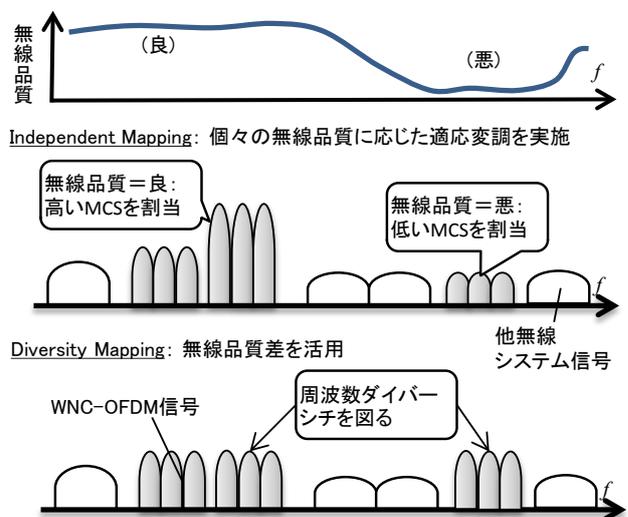


図9 WNC-OFDM 技術向け適応変調制御方式

の決定や、ある周波数帯で誤りが発生しても他の周波数帯で受信可能というような状況での誤り訂正符号の効果で、受信品質の向上が図れる [9].

今回、これら 2 種類の方式を検討対象としたのは、WNC-OFDM 技術のように幅広い周波数帯を利用する際に、通信性能の向上に適した適応変調方式を把握するためである。すなわち、IndMap での個々の周波数帯の無線品質に適した MCS を選択する制御、DivMap での無線品質差を活用して誤りを効果的に訂正することでエラーの低減を図る制御のいずれが通信性能向上に寄与するのかを比較することになる。

### 3.2 評価方法

3.1 で述べた内容について、計算機シミュレーションを用いた評価を実施した。適応変調制御方式以外で評価に用いたパラメータは次のとおりである。シミュレーション時間は 5 秒間とし、方式を純粹に比較するために他システムからの干渉はなしとした。

- 信号配置条件

幅広い周波数帯に散在した空き周波数帯域を利用することを考慮して、図 10 のような配置を行った。200MHz, 550MHz, 900MHz のそれぞれを先頭周波数とした周波数ブロックを 3 個設けている。各周波数ブロックの中で 36OFDM サブキャリアを 1 組とし、2.28MHz 間隔で 4 組を配置している。DivMap の場合、周波数ブロックの中で周波数ダイバーシチを取ることにした。また、送信電力は周波数帯に関わらず、一定とした。

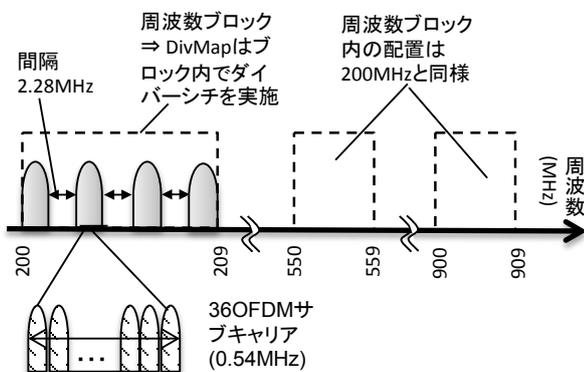


図 10 信号配置条件

- 伝搬路条件

無線品質の変化は周波数帯に加え、端末移動速度に依存することから、歩行(3km/h)、走行(30km/h)、高速(120km/h)、新幹線(200km/h)の 4 パターンで評価した。フェージングチャネルの遅延プロファイルは ITU-R の Vehicular A Model [10] を用いた。周波数ブロック間では、周波数が十分に離れていることから、独立にフェージングを発生させた。また、周波数ブロック内の OFDM サブキャリアの組の間においても、用いた遅延プロファイルにおける周波数特性から、ほぼ無相関と見なした。

- 適応変調の制御方法

今回の評価では、無線品質情報として CQI に含まれている SNR (Signal to Noise Ratio) を用いており、OFDM サブキャリア単位に CQI を通知している。IndMap の場合は、得られた個々の周波数の SNR から試験装置に設定しているテーブルを用いて MCS を決定した。DivMap の場合は、ある周波数ブロック全体の無線品質を得る際に、個々の OFDM サブキャリアの SNR から真値平均により MCS を決定する方法 (平均法) と、(1) で計算される EESM (Effective Exponential SNR) [11] による MCS を決定する方法 (EESM 法) の 2 通りを評価した。また、制御遅延については、0ms(遅延なしで理想状態)、2ms, 4ms, 6ms(一般的な制御遅延)、8ms, 10ms のそれぞれで評価を行った。

$$\gamma^{(eff)} = 10 \log_{10} \left[ -\beta \ln \left( \frac{1}{N} \sum_{n \in \text{FreqBlock}} e^{-\gamma_n / \beta} \right) \right] \quad (1)$$

$\gamma^{(eff)}$	EESM (dB)
$N$	周波数ブロック内の OFDM サブキャリア総数
$-\gamma_n$	測定された OFDM サブキャリア単位の SNR 値 (真値)
$\beta$	DivMap 効果係数 (17.0)

### 3.3 評価結果

3.2 の計算機シミュレーション結果から、平均物理スループットに着目して評価を実施した。なお、以降で「スループット」とは平均物理スループットとする。

適応変調制御方式の比較を行うために、制御遅延 6ms で DivMap は平均法とした場合における、端末の移動速度に対するスループットを図 11 に示す。各移動速度において、IndMap と DivMap(平均法)のスループットを比較すると、端末移動速度が 3km/h の場合は IndMap, 30km/h 以上の場合は DivMap(平均法) が若干スループットの向上が見られる。ただ、IndMap と DivMap(平均法) の差は 5%以内であり、実環境を考慮すると、差はほとんどないと考えてよい。

次に、CQI の通知時間を含む制御遅延が適応変調制御方式に与える影響について着目し、制御遅延を変化させた場

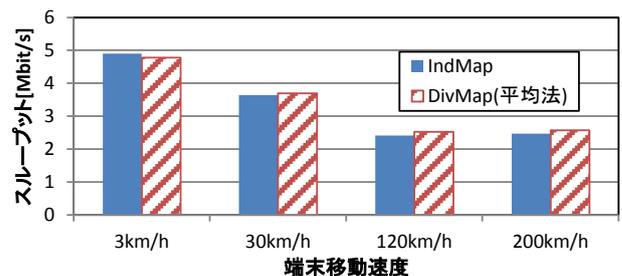


図 11 IndMap と DivMap の比較

合のスループットを図 12 に示す。スループットは、IndMap と DivMap(平均法)で同じような傾向となっている。端末の移動速度が 3km/h の場合は無線品質がほぼ変化しないことから制御遅延による影響はあまり見られないが、30km/h 以上の場合は顕著な影響が見られ、制御遅延の増加と共にスループットの劣化が発生している。無線品質の変化度合は端末移動速度に依存し、200km/h では制御遅延が 2ms でも 40%程度のスループットの劣化が存在する。WNC-OFDM 技術では、多数の周波数帯を同時に利用することから、多くの無線品質情報(CQI)の通知が必要となり、制御遅延が発生しやすくなる。しかし、制御遅延がスループット性能に与える影響が大きいことから、CQI のデータ量を少なくすることで制御遅延を小さくしつつ、正確な周波数毎の CQI を把握するための仕組みが必要であると考えられる。

制御遅延が 6ms の場合において、DivMap での平均法と EESM 法のスループット比較を行った結果を図 13 に示す。スループット的には、平均法の方が若干高いが、最大の差でも 3%程度であり、ほぼ差はないと言える。EESM 法は(1)のような式による計算が必要であるため、システムへの負荷を考慮すると、簡易な計算で対応可能な平均法の方が多少は有利であると考えられる。

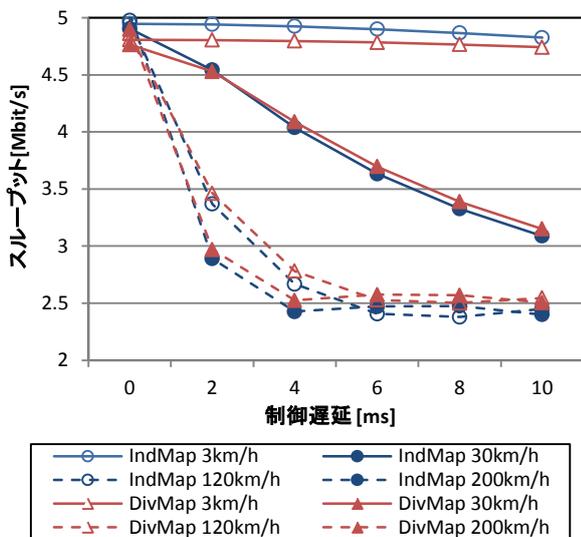


図 12 制御遅延のスループットへの影響

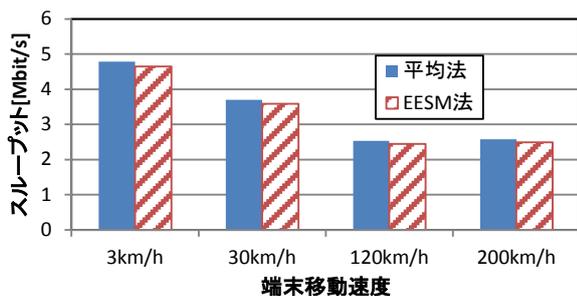


図 13 平均法と EESM 法の比較

### 3.4 考察

3.3 で述べた評価結果で、スループットは、制御遅延の影響はあるが、IndMap と DivMap の差異による影響はほとんど見られなかった。この理由を考察するため、周波数ブロック(200MHz, 550MHz, 900MHz) 毎の MCS 割当回数の分布を調査した。DivMap は平均法、制御遅延が 6ms とし、端末移動速度が 30km/h と 200km/h の場合における累積度数分布(CDF)を図 14, 図 15 に示す。なお、以降で「MCS が低い」とは MCS の数値が小さいこと、「MCS が高い」とは MCS の数値が大きいことを示しており、基本的には MCS の数値が大きいほど、一度に送信可能なデータ量が多くなる。

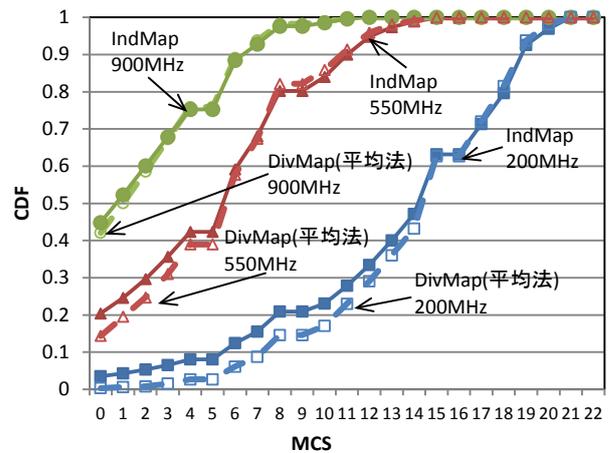


図 14 MCS 分布(端末移動速度 30km/h)

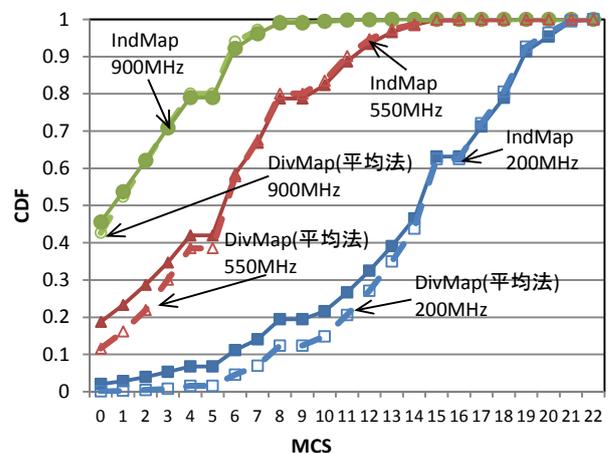


図 15 MCS 分布(端末移動速度 200km/h)

周波数帯に着目すると、周波数帯が高くなるほど、MCS は低い方向に分布している。これは、今回の評価条件で送信電力を周波数帯によらず一定にしているため、周波数帯に依存した伝搬ロス差により、このような傾向になったと考えられる。このことから、幅広い周波数帯を同時に利用する WNC-OFDM 技術を実環境に適用する際には、基地局において周波数帯毎の送信電力制御を行い、端末での受信品質が一定にする手法の検討が必要になると考えられる。

図 14, 図 15 で IndMap と DivMap(平均法)の MCS 分布の差に着目すると, DivMap(平均法)の方が全体的に MCS が高い方に分布している. しかし, 周波数帯が高くなるほど分布の差は無くなっており, 900MHz の場合ほとんど差は発生していない. また, ある周波数帯における MCS の高低方向の分布の差は, MCS が低い方が大きく, 高くなると小さくなる. 具体的には, 200MHz の場合は MCS14, 550MHz の場合は MCS5 でほぼ差が無くなっている. また, 端末移動速度の変化と MCS 分布の差は, IndMap では変化はなく, DivMap(平均法)で端末移動速度 3km/h に対して, 200km/h の方が高い方に MCS が分布している. しかし, 分布の差はほとんど見られず, スループットに対する影響はほぼないと考えられる.

これらの結果から, IndMap と DivMap での MCS 分布の差は小さく, さらに差が発生しているのは主に MCS が低い部分となっている. MCS が低い場合, 一度に送信可能なデータ量は少ないことから, スループットに及ぼす影響は限定的になる. このことが, IndMap と DivMap で方式の差異によるスループットへの影響がほとんど見られなかった原因であると考えられる. また, これらの結果は, 基地局のカバレッジの外側のような SNR が低い, すなわち MCS が低いような場合に, DivMap により MCS が改善できることも示している. このことは, 周波数帯毎の送信電力が一定の場合に, カバレッジを広くとれることを意味している. しかし, 図 11 に示すように端末移動速度が低速の場合は IndMap がスループットは勝っている. IndMap と DivMap のどちらの利点を取るかは, WNC-OFDM 技術の実環境への適用方法を含めて, 今後検討していく必要がある. なお, DivMap の平均法と EESM 法で MCS 分布は大きな違いはないことを確認しており, これまで述べた内容がそのまま適用可能である.

次に DivMap によるエラー低減効果を確認するため, IndMap, DivMap(平均法, EESM 法), 及び端末移動速度別に BLER(BLock Error Rate)を調査した結果を図 16 に示す. 図 16 で実線で示されている制御遅延 0ms の場合, DivMap(平均法, EESM 法)と IndMap を比較すると, DivMap の方が全体的に BLER は低く, 周波数ダイバーシチによるエラー低減が得られている. 例えば, 550MHz の端末移動速度 3km に着目すると, DivMap の BLER は IndMap よりも 10%程度低くなっている. しかし, 一般的な LTE システムの制御遅延 6ms を想定した破線の場合, IndMap と DivMap の BLER 差は制御遅延 0ms の場合よりも小さくなっており, 端末移動速度が高くなると差分はさらに小さい. 端末移動速度が上がった際に BLER が全体的に高くなる理由としては, 端末で CQI 通知時点と基地局での割当時点での無線品質のずれにより(図 8), エラーが発生しやすくなることが挙げられる. これによるエラー発生の影響が支配的で, DivMap での周波数ダイバーシチ効果によるエラー

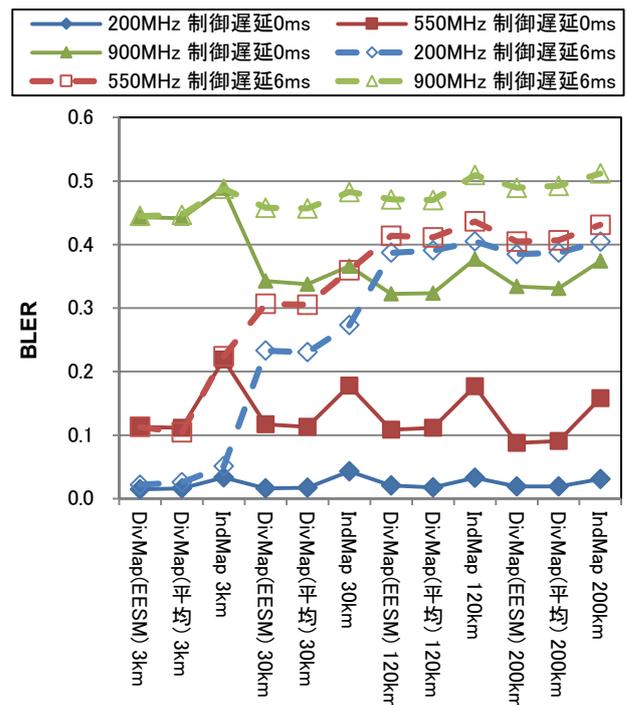


図 16 適応変調制御方式及び移動速度と BLER の関係

低減の効果が小さくなっている. 前述した MCS の分布に加え, BLER の状況も, スループットの差が IndMap と DivMap でほぼ発生しなかった原因と考えられる.

#### 4. まとめ

本稿では, 離散的な空き周波数帯域を活用し, 広帯域の移動体でのデータ通信を実現可能な WNC-OFDM 技術の概要を述べ, 通信品質のうち, スループット性能を左右する適応変調制御方式の基本的な性能評価を計算機シミュレーションで行った. その結果, 適応変調制御方式自体によるスループット性能への影響はほとんど無いことを示した. しかし, 無線品質(CQI)の通知時間を含む, 制御遅延がスループット性能に大きく影響することから, 効率的な無線品質情報の通知等により, 制御遅延を小さくする仕組みが必要であることを把握した. 加えて, 送信電力が一定の場合, 周波数帯毎の無線品質の差異が大きくなることから, WNC-OFDM 技術を実環境に適用する際には, 周波数帯毎の送信電力制御を検討する必要があることも得られた.

無線品質は, 端末の移動だけでなく, 他無線システムからの干渉の影響によっても変動する. WNC-OFDM 技術は広い周波数帯に散在する空き周波数帯域を利用して通信を行うため, 様々な無線システムからその利用状況に応じた干渉を受けることになる. 今後, 実環境で WNC-OFDM 技術を用いる場合を想定し, このような干渉や前述した内容を考慮した場合に, 適応変調制御方式がスループット性能に与える影響を評価していく予定である.

## 謝辞

本研究は総務省の「電波資源拡大のための研究開発」の平成24年度案件として開始した「広帯域離散 OFDM 技術の研究開発」の一環として実施している。

## 参考文献

- 1) Cisco Systems: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2013–2018, pp.3 (2014)
- 2) 堀端研志, 高草木恵二, 長谷川晃朗, 柴田達雄, 武内良男: 広帯域離散 OFDM 利用を想定した実環境における電波観測及び解析, 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-17-12 (2013).
- 3) Keiji, T. Issei, K. Kazuhiro, K. Akio, H. Hiroyuki, S. and Yoshio, T.: Implementation of Experimental Equipment with Wideband Non-Contiguous OFDM, *Proc. IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile 2014* (2014).
- 4) 3GPP: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation, TS36.211 Rel.8 (2008).
- 5) Rajbanshi, R. Wyglinski, A. M. and Minden, G. J.: An efficient implementation of NC-OFDM transceivers for cognitive radios, *Proc. CROWNCOM 2006*, pp.1-5, IEEE (2006).
- 6) Poston, J. D. and Home, W. D.: Discontiguous OFDM considerations for dynamic spectrum access in idle TV channels, *Proc. DySPAN 2005*, pp. 607-610 (2005).
- 7) Guffey, J. D. Wyglinski, A. M. and Minden, G. J.: Agile radio implementation of OFDM physical layer for dynamic spectrum access research, *Proc. GLOBECOM 2007*, pp. 4051-4055 (2007).
- 8) 3GPP: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Carrier Aggregation; Base Station (BS) radio transmission and reception, TR36.808 Rel.10 (2013).
- 9) Qiu, W. Minn, H. and Chong, C. C.: Enhanced Frequency Diversity Exploitation in Carrier Aggregation for LTE-Advanced Systems, *Proc. VTC fall 2011*, pp. 1-6 (2011).
- 10) ITU-R: Guidelines For Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, M.1225 (1997).
- 11) Song, H.: Exponential Effective SNR Mapping: on the statistical characterization of EESM effective SNR over frequency selective channels, VDM Verlag Dr. Müller (2010).