

LTE-Advancedシステム向け帯域拡張技術の開発

Development of Carrier Aggregation Technology for LTE-Advanced System

大 泉 透 西 尾 昭 彦 今 村 大 地
Toru Oizumi Akihiko Nishio Daichi Imamura

要 旨

国際標準化団体3GPP (3rd Generation Partnership Project) では、2008年にLTE (Long Term Evolution) としてRelease 8規格を、2011年にはLTE-AdvancedとしてRelease 10規格を策定しており、当社は継続的に技術開発を行いその規格化に貢献してきた。LTE-Advancedでは、最大伝送レート向上のための帯域拡張技術として、複数のLTEキャリアを束ねて通信するCA (Carrier Aggregation) が新規導入される。CAにおいては、1つの上りリンクCC (Component Carrier) のみから上りリンク制御チャンネルを送信することがカバレッジの確保の観点で重要である。筆者らは、その実現方法としてチャンネルセレクション技術を提案した。さらに、チャンネルセレクションにおいて誤り率特性が最も悪いAck/Nack (Acknowledgement/Non-acknowledgement) ビット の特性を改善することで、端末の上りリンク制御チャンネルの送信電力を低減するAck/Nackマッピング方法を開発した。CA適用時においてもカバレッジの確保と端末の消費電力削減を実現できることを示した。

Abstract

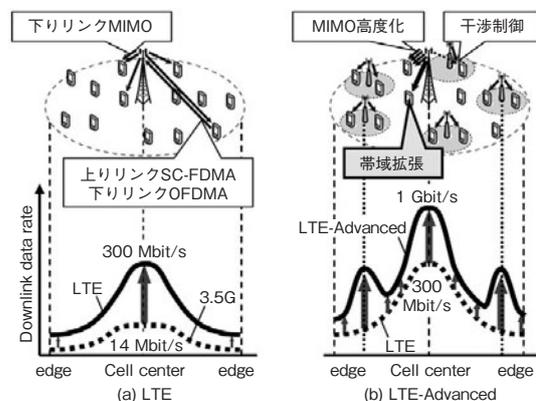
We have continuously developed transmission technologies for the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Release 8 specification, called Long Term Evolution (LTE), and Release 10, called LTE-Advanced. In LTE-Advanced, 3GPP introduces Carrier Aggregation (CA) to achieve a higher peak rate by expanding the effective bandwidth delivered to a user through concurrent utilization of Component Carriers (CCs). For CA, from a coverage perspective, we proposed channel selection which enables transmitting the uplink control channel on only one uplink CC. We further developed Acknowledgement/Non-acknowledgement (Ack/Nack) mapping for channel selection to reduce transmission power for the uplink control channel by improving the worst-case error rate performance for Ack/Nack bits.

1. はじめに

モバイル通信におけるトラフィックの急増が予測される中、国際標準化団体3GPPでは、無線インターフェース規格化において高速・大容量な無線通信システムを実現すべく、2008年にLTEとしてRelease 8規格を、2011年にはLTE-AdvancedとしてRelease 10規格を策定してきた。

LTEは、下りリンクで最大300 Mbit/s、上りリンクで最大75 Mbit/s伝送を達成する。多重アクセス方式として、下りリンクにOFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) を採用し、マルチパス干渉への高い耐性、周波数領域スケジューリングおよびMIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術との高い親和性を備える。上りリンクにはSC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) を採用し、マルチパス干渉への高い耐性および周波数領域スケジューリングとの親和性に加えて、低PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) 特性を備えており、上りリンクのカバレッジを最大化する (第1図(a))。

一方、LTE-Advancedでは、最大伝送レートを向上させる帯域拡張技術として、CC (Component Carrier) とよばれるLTEのシステム帯域を複数束ねる、CA (Carrier Aggregation) が導入される。また、空間多重の活用によ



第1図 LTEおよびLTE-Advancedの技術と伝送レート

Fig. 1 Technology and data rate for LTE and LTE-Advanced

るさらなる周波数利用効率を向上させるために、下りリンクMIMOの高度化と上りリンクMIMOの導入が行われる。さらに、都心部のトラフィック増加を収容するために、広いカバレッジのマクロ基地局に加えて狭いカバレッジのピコ基地局を併用する場合における、マクロ基地局からピコ基地局配下の端末への干渉軽減技術が導入される。これらの技術により、LTE-Advancedでは、下りリンクで最大1 Gbit/s、上りリンクで最大500 Mbit/s伝送を達成するとともに、高いユーザースループットが得

られるエリアをLTEよりも増加させることができる（第1図 (b)）。当社はLTEに続き、LTE-Advanced向け技術開発を行い、その規格化に貢献してきた。

LTE-Advancedで新規導入されるCAでは、LTEとの後方互換性を維持しつつ、LTE-Advanced端末に対しては端末の能力に応じて複数のCCを設定できる。端末は1CC当たり1.4, 3, 5, 10, 15または20 MHz帯域幅のCCを5つまで同時接続でき、LTEに比べて最大5倍の伝送レート向上が期待できる。しかしながら、接続するCC数の増加に伴い、上りリンク制御信号の増加による端末の所要送信電力の増加と、複数信号の同時送信に伴うPAPR増加によるカバレッジの縮小が課題となる。

そこで、筆者らは、複数CCの下りリンクデータに対するAck/Nack (A/N) を1つの上りリンク制御チャンネルに多重することにより、端末の所要送信電力の低減とカバレッジの確保を同時に実現するチャンネルセレクション技術の導入を提案した。さらにチャンネルセレクションにおいて、端末の上りリンク制御チャンネルの送信電力を低減するAck/Nackマッピング方法を開発した。

本稿の構成は次のとおりである。第2章および第3章で、背景となる帯域拡張技術およびA/N多重方法についてそれぞれ説明する。第4章で、1CCにおけるA/Nマッピング方法を説明する。さらに、チャンネルセレクションにおけるA/Nマッピング方法を説明する。第5章でシミュレーション評価によりその効果を検証する。第6章で本稿をまとめる。

2. 帯域拡張技術

帯域拡張 (CA) は、LTEシステム帯域 (CC) を複数束ねることで最大伝送レートを向上させる技術である。端末が複数のCCを用いる場合、第2図に示すように、1つのCCがPrimary CCに設定され、残りのCCはSecondary CCとして設定される。また、下りリンクCCと上りリンクCCはペアになっている。下りリンクでは、下りリンクおよび上りリンクのデータ割当情報を通知する下りリ

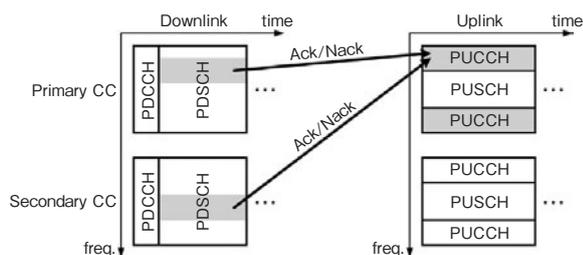
ンク制御チャンネル (PDCCH: Physical Downlink Control CHannel), および下りリンク共有チャンネル (PDSCH: Physical Downlink Shared CHannel) が送信され、上りリンクでは上りリンク制御チャンネル (PUCCH: Physical Uplink Control CHannel) および上りリンク共有チャンネル (PUSCH: Physical Uplink Shared CHannel) が送信される。

PUCCHは、下りリンクデータに対するA/N応答、回線品質報告、上りリンク帯域割当要求の送信に使用するチャンネルであり、A/N応答用のPUCCHは、下りリンクデータの再送要求 (端末がNackを送信し基地局が下りリンクデータを再送する) に使用されるので、特に低い誤り率が求められる。しかしながら、CA適用時にすべての上りリンクでPUCCHを送信すると、PAPRの増加によって端末の最大送信電力が制限され、CAが可能な範囲 (カバレッジ) が制限される。そのためLTE-Advancedでは、端末のPAPR増加を抑えるために、複数の下りリンクCCにおける下りリンクデータに対するA/N応答を、Primary CCのPUCCHのみに多重して送信する新たな仕組みが必要である。

LTEおよびLTE-Advancedでは、MIMO送信により1CC当たり下りリンクのデータブロック (TB: Transport Block) を2つまで同時に送信でき、TBごとにA/Nビットを生成する。LTEでは1CCのみの運用であるため、QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 信号を用いて最大2ビットのA/N送信が規定される。一方、LTE-AdvancedではCAをサポートするために最大10ビットのA/N送信方法が必要となる。ここで、複数の周波数リソースを用いて送信するとPAPRの増加によるカバレッジの劣化を招く。

LTE-AdvancedではCA適用時のA/N多重方法として、使用頻度が高いと思われる2CC (2, 3, 4ビット) に特化して、2, 3, 4ビットにおいてそれぞれ良好な誤り率特性をもつA/N多重方法と、5CC (10ビット) までをサポートし、A/Nビット数が多い場合に良好な誤り率特性をもつA/N多重方法があり、本稿では2CCに特化したA/N多重方法について説明する。なお、5CCまでのA/N多重方法としては、DFT-Spread-OFDM (Discrete Fourier Transform-Spread-OFDM) ベースのA/N送信が採用される。

筆者らは、TDD (Time Division Duplex) 方式における1CCのA/N多重方式として従来用いられていたチャンネルセレクション技術を応用し、2CCのA/N多重方式として導入することを提案した[1]。チャンネルセレクションは、周波数軸上の位置と符号系列の組合せにより定義される複数のPUCCHリソースおよび各PUCCHリソース内の複数の信号点位置 (位相点) の候補の中から、複数A/Nビットの組合せに対応したPUCCHリソースおよび信号点位



第2図 CAにおけるチャンネル構成とAck/Nack送信

Fig. 2 Channel structure and Ack/Nack transmission for CA

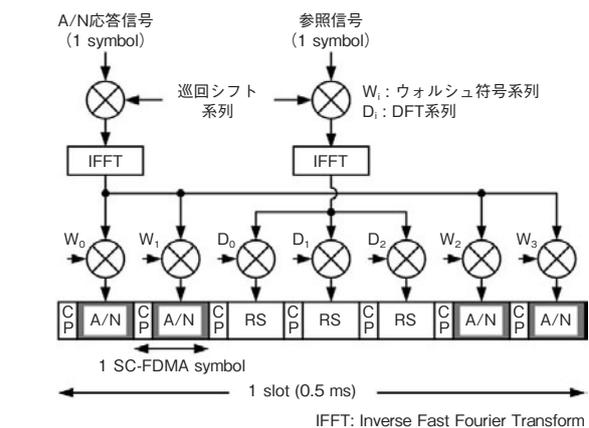
置を1つ選択して送信する技術である。チャネルセクション技術の導入により、1つの上りリンクCCのみにおいてPUCCHを送信できるため、すべての上りリンクCCにおいてPUCCHを送信する場合に比べて、端末における送信信号のPAPRを2.7 dB低減できる[2]。さらに、チャネルセクションにおける複数のA/Nビットの組合せと、PUCCHリソースおよび信号点位置との対応（A/Nマッピング）によってA/N誤り率が異なるため、より低いA/N誤り率を実現するA/Nマッピング方法を開発した[3]。

3. Ack/Nack多重方法

LTE-Advancedの2CCにおけるA/Nマッピング方法を説明するために、本章ではさらに、背景となる上りリンク制御チャネル（PUCCH）の構成、A/N信号のPUCCHへの配置方法について説明する。

上りリンク制御チャネル（PUCCH）は、第3図に示すように、周波数軸において上りリンク共有チャネル（PUSCH）を挟んでシステム帯域の両端に配置され、サブフレームとよばれる時間単位で各端末に無線リソースが割り当てられる。また、1サブフレームは2スロットで構成され、1スロットは7つのSC-FDMAシンボルで構成される。さらに、1 SC-FDMAシンボルは信号波形およびCP（Cyclic Prefix）で構成される。また、PUCCHでは、周波数選択性フェージング環境下でも安定した応答信号の伝送品質を保つために、無線リソースをスロット単位でシステム帯域の両端にホッピングさせる[4]。

続いて、A/N応答信号のPUCCHへの配置方法について説明する。PUCCHでは、A/N応答信号に対して2段階の符号拡散を行う（第4図）。一次拡散符号として系列長12の巡回シフト系列、二次拡散符号として系列長4のウォルシュ符号系列を用いる。拡散されたA/N応答信号は1, 2, 6, 7番目のSC-FDMAシンボルに配置される。また、基地局が端末からのA/N応答信号を復号するために用いる参照信号（RS: Reference Signal）に対しては、一次拡散符号として巡回シフト系列、二次拡散符号として系列長3のDFT系列が用いられ、拡散された参照信号は3, 4, 5番目のSC-FDMAシンボルに配置される。一次拡散に用いられる巡回シフト系列、二次拡散に用いられる直交符号系列（ウォルシュ符号系列またはDFT系列）のいずれも、系列長と同数の互いに直交する系列の組をもつ。



第4図 PUCCHにおけるA/Nの拡散方法
Fig. 4 Code spreading for A/N on PUCCH

ルシュ符号系列を用いる。拡散されたA/N応答信号は1, 2, 6, 7番目のSC-FDMAシンボルに配置される。また、基地局が端末からのA/N応答信号を復号するために用いる参照信号（RS: Reference Signal）に対しては、一次拡散符号として巡回シフト系列、二次拡散符号として系列長3のDFT系列が用いられ、拡散された参照信号は3, 4, 5番目のSC-FDMAシンボルに配置される。一次拡散に用いられる巡回シフト系列、二次拡散に用いられる直交符号系列（ウォルシュ符号系列またはDFT系列）のいずれも、系列長と同数の互いに直交する系列の組をもつ。

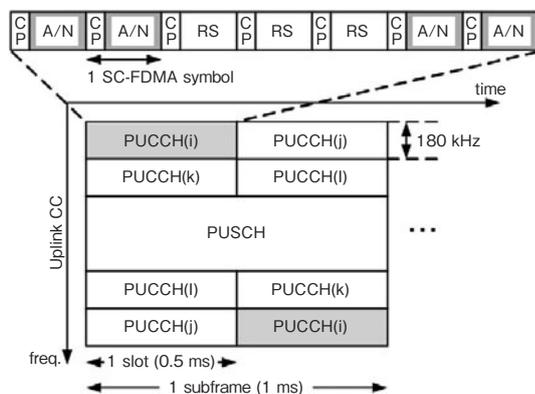
以上のようにして、A/N応答信号の送信に用いるPUCCHリソースは、周波数軸上の位置と符号系列の組合せによって定義される。

4. Ack/Nackマッピング方法

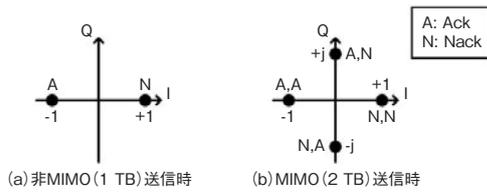
本章では、1CCにおけるA/Nマッピング方法について説明する。その後、チャネルセクションにおける参照A/Nマッピング方法と、著者らが開発したA/Nマッピング方法について説明する。

4.1 1CCにおけるAck/Nackマッピング方法

1CCの下りリンクデータ送信では、非MIMO送信時は1つのTBが送信され、MIMO送信時は、2つのTBが同時に送信される。したがって端末では、第5図に示すように、非MIMO送信時はサブフレーム当たり1ビット（1 TBに対応）のA/NをBPSK（Binary Phase Shift Keying）シンボルにマッピングする。また、MIMO送信時はサブフレーム当たり2ビット（2 TBに対応）のA/NをQPSKシンボルにマッピングすることで、1シンボルのA/N応答信号を生成する。



第3図 PUCCHのサブフレーム内構成
Fig. 3 PUCCH structure in subframe



第5図 ICCにおけるA/Nマッピング
Fig. 5 A/N symbol mapping for ICC

4.2 2CCにおけるAck/Nackマッピング方法

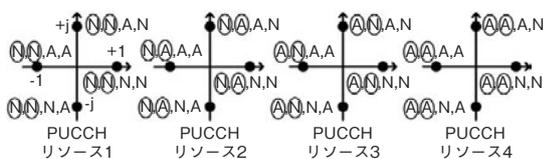
チャンネルセレクションでは、2CCのCA適用時に発生する2, 3, 4ビットのA/N送信に対して、それぞれ2, 3, 4個のPUCCHリソースを割り当てる。以降では、4ビット（2CCの各CCでMIMO（2 TB）送信を行う場合）のA/N送信について説明するが、2, 3ビットのA/N送信についても同様であるため割愛する。

4ビットのA/N送信の場合、A/N情報が取りうる $2^4=16$ 個の組合せに対して、PUCCHリソースと信号点位置の対応（A/Nマッピング）をあらかじめ定義する。端末はA/N情報により選択したPUCCHリソースと信号点を用いて信号を送信し、基地局では信号が検出されたPUCCHリソースとその信号点位置からA/N情報を判定する。

[1] 参照Ack/Nackマッピング

チャンネルセレクションにおけるA/Nマッピングとして、3GPPにおいて参照A/Nマッピング（第6図）[5]が提案された。参照A/Nマッピングは、第5図（b）のICCにおけるA/Nシンボルマッピングの2ビットを3, 4ビット目とし、各PUCCHリソースにおいて、1, 2ビット目にそれぞれ“N,N”, “N,A”, “A,N” および “A,A” を付加して4ビットに単純拡張したものである。

第6図のPUCCHリソースごとの各A/Nビットにおいて、PUCCHリソースのみでA/N判定が可能なビット、つまりPUCCHリソース内のすべての信号点でA,Nの状態が同じビットに円を付記し、PUCCHリソース内の信号点位置検出によってA/N判定が可能なビットには円を付記しない。このように、参照A/Nマッピングでは、1, 2ビット目と3, 4ビット目とでA/N判定方法が異なり、特性も



第6図 2CCにおける参照A/Nマッピング
Fig. 6 Reference A/N mapping for 2CCs

また異なると考えられる。さらに、PUCCHリソース内の信号点位置検出によってA/N判定が可能な3, 4ビット目は、PUCCHリソースのみでA/N判定が可能な1, 2ビット目よりも特性が悪いと考えられる。

より具体的には、参照A/Nマッピングでは、基地局は、端末から報告されるA/N応答信号をPUCCHリソース1で検出すれば、そのPUCCHリソース内の信号点位置によらず、A/N情報の1, 2ビット目が共にNack (“N,N”) であると判定できる。一方で3, 4ビット目は、PUCCHリソース1内の信号点位置検出によってA/Nを判定できる。同様に、A/N応答信号をPUCCHリソース2, 3, 4で検出すれば、1, 2ビット目は、それぞれ “N,A”, “A,N”, “A,A” であると判定できるが、3, 4ビット目はPUCCHリソース内の信号点位置検出によってA/Nを判定できる。

[2] 提案Ack/Nackマッピング

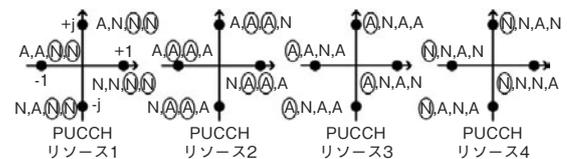
前述したとおり、参照A/Nマッピングでは、A/N判定方法がビットごとに異なるために、誤り率特性もビットごとに異なると考えられる。

ここで、端末のPUCCH送信電力は、基地局における所要誤り率を満足するために、誤り率特性が最も悪いビットに合わせて制御する必要がある。そのため、ビット間の誤り率特性が異なると、誤り率特性が最も悪いビットに合わせて、高いPUCCH送信電力が必要になる。

そこで著者らは、ビット間の誤り率特性の不均一を抑えつつ誤り率特性が最も悪いビットの特性を改善して、端末のPUCCH送信電力を低減することを目的として、PUCCHリソースに基づく判定を各A/Nビットで最大限利用するA/Nマッピング（第7図）[3]を開発した。

第7図に示す提案A/Nマッピングでは、基地局は、A/N応答信号をPUCCHリソース1で検出すれば3, 4ビット目のA/Nを判定できる。同様に、A/N応答信号をPUCCHリソース2, 3, 4で検出すれば、それぞれ2, 3ビット目, 1ビット目, 1ビット目のA/Nを判定できる。言いかえると、PUCCHリソース検出のみで（すなわち信号点位置に依存せず）A/N判定が可能なPUCCHリソース数は、1ビット目においてはPUCCHリソース3, 4の2個である。同様に、2, 3, 4ビット目の順に、1個, 2個, 1個である。

これにより提案A/Nマッピングは、いずれのA/Nビット



第7図 2CCにおける提案A/Nマッピング
Fig. 7 Proposed A/N mapping for 2CCs

トにおいても、全PUCCHリソースにおいてPUCCHリソース検出のみでA/Nを判定できる構成ではないため、参照A/Nマッピングの1, 2ビット目の誤り率特性よりも悪いことが予想できる。その一方で、いずれのA/Nビットにおいても、少なくとも1つのPUCCHリソースにおいて、PUCCHリソース検出のみで（すなわち信号点位置に依存せず）A/Nを判定できる構成としているため、参照A/Nマッピングの3, 4ビット目の誤り率特性よりも良いことが予想できる。

つまり、提案A/Nマッピングは、参照A/Nマッピングに比べて、誤り率特性が最も良いビットが劣化する一方で、誤り率特性が最も悪いビットは改善される。

5. シミュレーション結果

本章では、参照A/Nマッピングと提案A/Nマッピングの比較評価を行い、提案A/Nマッピングの効果を検証する。

評価に用いたリンクレベルシミュレーションの諸元を、第1表に示す。評価は、サブフレームごとにA/N応答信号をランダム（一様分布）に発生させて送信する。基地局においてNackをAckと誤判定する（Nack-to-Ack）誤り率をA/Nビットごとに取得し、3GPPが規定する要求条件[6]に従い、Nack-to-Ack誤り率の目標値を0.1%とした。

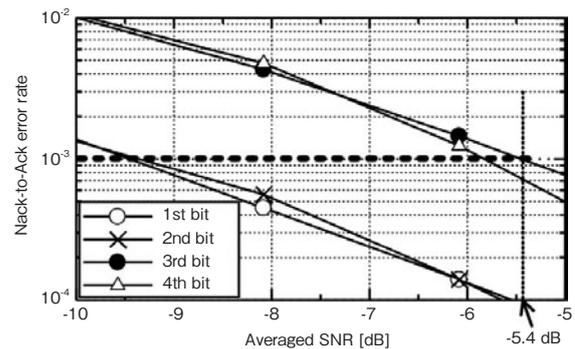
第1表 シミュレーション諸元

Table 1 Simulation assumption

Parameter	Assumption
Carrier frequency	2 GHz
System bandwidth	5 MHz
A/N signal bandwidth	180 kHz
Channel model	Extended Typical Urban[7] 3 km/h
Uplink antenna configuration	1×2

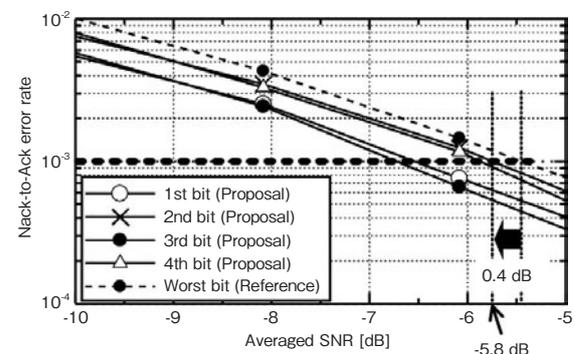
参照A/Nマッピングにおける、各A/NビットのNack-to-Ack誤り率特性を、第8図に示す。目標Nack-to-Ack誤り率0.1%を達成する所要平均SNR（Signal-to-Noise Ratio）は、1, 2, 3, 4ビット目の順に、-9.4 dB, -9.4 dB, -5.4 dB, -5.8 dBである。1, 2ビット目に比べて3, 4ビット目の特性が悪く、また、Nack-to-Ack誤り率特性が最も悪い3ビット目が、端末のPUCCH送信電力の削減に対するボトルネックであることがわかる。

提案A/Nマッピングにおける、各A/NビットのNack-to-Ack誤り率特性を、第9図に示す。また、参照A/NマッピングにおけるNack-to-Ack誤り率特性が最も悪い3ビット目の特性を破線で示す。目標Nack-to-Ack誤り率0.1%を達成する所要平均SNRは、1, 2, 3, 4ビット目の順に、



第8図 参照A/Nマッピングの誤り率特性

Fig. 8 Error rate of reference A/N mapping



第9図 提案A/Nマッピングの誤り率特性

Fig. 9 Error rate for proposed A/N mapping

-6.6 dB, -5.8 dB, -6.7 dB, -5.9 dBとなり、1, 3ビット目の誤り率特性が2, 4ビット目よりも良い。また、端末のPUCCH送信電力を決定する、Nack-to-Ack誤り率特性が最も悪いビットにおける所要平均SNRは、参照A/Nマッピングにおける-5.4 dBから-5.8 dBに改善した。

複数の下りリンクCCにおける下りリンクデータに対するA/N応答信号を、Primary CCのみから送信するチャンネルセレクションの導入による、端末のPAPR改善効果2.7 dBと合わせ、計3.1 dBの改善により端末のPUCCH送信電力を低減できるため、CA適用時においてもカバレージの確保と端末の消費電力削減を実現できる。

6. まとめ

LTE-Advanced向けの帯域拡張技術として開発および規格化に貢献したチャンネルセレクション時のA/Nマッピング方法について述べた。チャンネルセレクションを導入することでPAPRを2.7 dB改善し、さらに、PUCCHリソースに基づく判定を各A/Nビットで最大限利用することで、Nack-to-Ack誤り率特性が最も悪いビットの特性を

0.4 dB改善した。計3.1 dBの改善により端末のPUCCH送信電力を低減できるため、CA適用時においてもカバレッジの確保と端末の消費電力削減を実現できることを示した。

参考文献

- [1] 3GPP R1-100364, "Support of UL ACK/NACK channel selection for carrier aggregation," 2010.
- [2] 3GPP R1-084225, "Comparison between clustered DFT-s-OFDM and OFDM for supporting non-contiguous RB allocation within a component carrier," 2008.
- [3] 3GPP R1-105476, "Mapping tables for format 1b with channel selection," 2010.
- [4] 3GPP TS36.211 V10.5.0, "E-UTRA physical channels and modulation (Release 10)," 2012.
- [5] 3GPP R1-104140, "ACK/NAK multiplexing simulation assumptions in Rel-10," 2010.
- [6] 3GPP TS36.104 V10.6.0, "E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 10)," 2012.
- [7] 3GPP TS36.101 V10.6.0, "E-UTRA User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 10)," 2012.

執筆者紹介



大泉 透 Toru Oizumi
AVCネットワークス社 ビジネスソリューション
事業グループ アビオニクスビジネスユニット
Avionics Business Unit, Business Solutions Business
Group, AVC Networks Company



西尾 昭彦 Akihiko Nishio
R&D本部 事業開発推進室
Business Development Promotion Office, R&D
Div.



今村 大地 Daichi Imamura
R&D本部 エネルギーソリューションセンター
ソリューション開発室
Solutions Development Office, Energy Solutions
Center, R&D Div.