

# 5G高信頼・低遅延通信（URLLC） の屋外実験

先進技術研究所 5G推進室

いわぶち まさし  
岩淵 匡史  
きしやま よしひさ  
岸山 祥久

ベンジャブール アナス  
おくむら ゆきひこ  
奥村 幸彦

第5世代移動通信システム（5G）の実現に向けて、標準化議論や実証実験が進められている。自動運転や遠隔制御を実現するために必要となる高信頼・低遅延通信（URLLC）も5Gにおいて期待されている利用シナリオの1つである。ドコモではURLLCの実現に向けて屋外実験を行ってきた。本稿では、URLLCの概要について解説するとともに、ファーウェイとの共同により約1kmを含むさまざまな通信距離でURLLCを実証した屋外実験を取り上げ、最新の実験成果を紹介する。

## 1. まえがき

移動通信における爆発的なトラフィックの増大やサービスの多様化への対応として、第5世代移動通信システム（5G）の導入が期待されている。5Gの導入に向けては、3GPPなどでの標準化議論や、各国の主要団体および企業による実証実験が進められている。ドコモにおいても、2010年頃から5Gの実現に向けた活動を開始し、技術コンセプトの提案、伝送実験、標準化議論を主導してきた。

5Gの代表的な利用シナリオには、①モバイルブ

ロードバンドのさらなる高度化（eMBB：enhanced Mobile BroadBand）、②多数同時接続を実現するマシンタイプ通信（mMTC：massive Machine Type Communications）、③高信頼・低遅延通信（URLLC：Ultra-Reliable and Low-Latency Communications）が挙げられている [1]。特に、URLLCは将来の新たなユースケース（自動運転、触覚通信、遠隔医療など）を実現する利用シナリオとして注目されている。今回ドコモはファーウェイと共同で、URLLCにおいて要求されている「高信頼」と「低遅延」を、屋外実験によって同時に実現することに世界で初めて

成功した。本稿では、URLLCの概要と屋外実験について解説する。

## 2. URLLCの概要

5Gのユースケースやそれらを実現するための技術的要件は、国内外の業界団体において議論されてきた [1]～[3]。eMBBでは、4Gまでと同様に高速・大容量化の延長として要件などが規定された。一方で、mMTCやURLLCでは、IoT（Internet of Things）に対する産業界における期待の高まりを受け、自動車、ロボット、センサなどの移動通信以外の業界との連携を見据えて要件などが規定された。

### 2.1 URLLCのユースケース

URLLCでは、高信頼と低遅延の両方を要求する交通制御や遠隔制御などのサービスを主なターゲットとしており、代表的な例として以下のユースケースが挙げられている [3]。

#### (1)自動運転制御および交通制御

交通事故の低減、交通効率の改善および緊急車両の移動をサポートするために、車車間、路車間のみならず、歩行者などに対しても警告信号を送信するといったユースケースが挙げられている。

#### (2)ロボット制御およびドローンなどとの3次元接続

スマートファクトリーなど、ロボットによる製造業の自動化や運送業の自動化が期待されており、5Gを用いてそれらを制御するユースケースが挙げられている。また、地上だけでなく空中もカバレッジとし、空中を飛行するドローンなどに対して遠隔制御することも想定されている。

#### (3)遠隔手術

遠隔手術は光通信などの固定のネットワークを用いることにより実現可能であるが、災害地や危険地帯への適用が困難である。そのような地域においても5Gを用いて遠隔手術を実現するユースケースが

挙げられている。

上記のユースケースではいずれも高信頼および低遅延が要求され、また、そこで使用される無線システムは主に制御信号のやり取りに用いることが想定されている。そのため5Gでは、URLLCに対して高い伝送速度や多端末接続を要求しない代わりに、信頼性、低遅延およびモビリティに厳しい条件を求めている。

### 2.2 URLLCの要件と課題

URLLCの要件はコアネットワークを含むEnd-to-Endの目標値も議論されているが、本稿では無線アクセスネットワークにおけるURLLCの要件について解説する。

#### (1)URLLCの要件

URLLCの要件の定義は業界団体によってさまざまではあるが、例えば3GPPでは「 $X$  bytesのパケットを一定時間以下の遅延で受信に成功する確率」としている [4]。ここで遅延とは、送信側における無線のプロトコルレイヤ\*1 2（もしくは3）のサービスデータユニット\*2の処理開始から、受信側においてパケットを正常に受信するまでに要した時間であり、無線区間遅延（またはユーザプレーン\*3遅延）と呼ばれる。無線区間遅延の定義を図1に示す。無線区間遅延はパケットの受信成功までに要する片道の遅延であり、パケット受信に失敗した場合には1回以上の再送に要する時間を含む。以上よりURLLCを実現するためには、一定以上のパケット受信成功確率（高信頼）を満足しながら、同時に一定以下の無線区間遅延（低遅延）も達成しなければならない。また、URLLCについて具体的な目標値も掲げられている。3GPPにおいては、「32bytesのパケット送信時に1ms以下の無線区間遅延かつ99.999%以上のパケット受信成功確率の達成」を目標値としている。

\*1 プロトコルレイヤ：ネットワーク構造の設計指針であるOSI参照モデルにて定義される通信プロトコルの層。プロトコルレイヤ2はデータリンク層、プロトコルレイヤ3はネットワーク層を指す。

\*2 サービスデータユニット：ヘッダなどが付加されていないデータのこと。

\*3 ユーザプレーン：通信で送受信される信号のうち、ユーザが送受信するデータの部分。

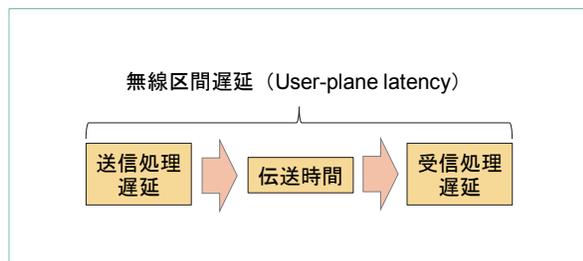


図1 無線区間遅延の定義

## (2)要件達成に向けた課題

低遅延化の観点からURLLCの要件達成のためには、①無線信号の伝送時間の短縮、②再送に要する時間の短縮、が必要である。また、高信頼化の観点からは、③パケット受信成功確率の改善、が必要である。これらについて以下に詳述する。

### ①無線信号の伝送時間の短縮

信号の送信単位であるスロット長が長い場合、無線信号の伝送時間も長くなる。例えば、第4世代移動通信システム（4G）であるLTE-Advancedでは、無線信号を伝送するだけで無線区間遅延が1msを超えてしまう。すでに述べた通り、無線区間遅延は送信および受信の信号処理遅延を含むため、スロット長を短くすることが望ましい。

### ②再送に要する時間の短縮

信号の再送によりパケット受信成功確率を高めることができるが、再送の手順においては下りリンクおよび上りリンクの信号のやり取りが発生するため遅延が生じる。下りリンクを例に説明すると、移動局が下りリンクの信号を正しく受信できなかった場合もしくは一定時間内に下りリンクの信号を受信できなかった場合、上りリンクチャンネルによりNACK（Negative Acknowledgement）信号<sup>\*4</sup>をフィードバックする。基地局はNACK信号を受信した後、下りリンクチャンネルを用いて再送信号を送信する。これによりパケット受信成功確率を改善するこ

とができるが、その分無線区間遅延は長くなってしまう。そのため、高信頼と低遅延を同時に達成するには、再送に要する時間を短くすることが重要である。

### ③パケット受信成功確率の改善

低遅延を達成しつつパケット受信成功確率を高めるためには、できる限り再送を行うことなく1度の送信で受信成功できることが望ましい。特に、マルチパス環境<sup>\*5</sup>下ではフェージング<sup>\*6</sup>の発生により無線チャンネルが劣化しやすく、パケット受信成功確率も低下しやすい。そのような環境下でも高いパケット受信成功確率を維持する必要がある。

## 3. URLLCを実現する技術

高信頼化および低遅延化を実現するために、新たな無線フレーム構成、再送方式、Grant-freeアクセス<sup>\*7</sup>のような新しい送信方式について議論がされている。ここでは、屋外実験で適用した技術を中心に、URLLCを実現する技術について解説する。なお、本実験ではTDD（Time Division Duplex）<sup>\*8</sup>方式を前提とする。

### 3.1 伝送時間を短縮する無線フレーム構成

#### (1)NRとして検討されている無線フレーム構成

3GPPにおける5Gの議論では、LTE-Advanced無線通信方式と後方互換性のない、新たな無線通信方式（NR：New Radio）の検討も行われている。NRでは、高い周波数帯までのサポートなどさまざまな要求条件に対応するために、複数の異なるOFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing）<sup>\*9</sup>サブキャリア<sup>\*10</sup>間隔（15, 30, 60, 120kHz）が採用される [5]。120kHzなどの広いOFDMサブキャリア間隔を用いることによりサブキャリア当りの周波数帯域幅が広くなり、短い時間で同じ情報量を伝

\*4 NACK信号：データを正常に受信できなかった場合に、そのことを送信側に知らせるために通知される信号。なお、データを正常に受信した場合は、ACKと呼ばれる信号が通知される。

\*5 マルチパス環境：送信側からの直接波とビルなどに反射して到来した波が多重して受信される環境のこと。

\*6 フェージング：移動局の移動や時間の経過によって受信レベル

が変動する現象のこと。

\*7 Grant-freeアクセス：移動局が送信するときに、あらかじめ基地局に送信許可（Grant）を受けることなく送信が可能な方式。

\*8 TDD：下りリンクと上りリンクの通信を時間で区切り、送信と受信を切り替えながら通信を行う方式。

送することができる。結果として、無線信号の伝送時間を短くすることができるため、遅延を低減することができる。ただし、サブキャリア数は少なくなるため、オーバーヘッドを無視すれば一定時間に送信できる情報量は変わらない。他にも、OFDMサブキャリア間隔を従来通りの15kHzとした上で、Mini-slot<sup>\*11</sup>と呼ばれるスロットの導入によるアプローチも提案されている [6]。また、下りリンクと上りリンクの送信を素早く切り替えられるように無線フレームを設計することにより、再送に要する時間を短くすることができる。本実験では、広いOFDMサブキャリア間隔を適用するアプローチを採用し、新たに無線フレームを設計することにより低遅延化を図る。

## (2)本実験における無線フレーム構成

本実験で導入した無線フレーム構成を図2に示す。

本無線フレーム構成では60kHzのサブキャリア間隔を採用しており、OFDMシンボル<sup>\*12</sup>長は、サブキャリア間隔の逆数で定義されるため $16.67\mu\text{s}$ であり、さらに $1.56\mu\text{s}$ の長さをもつCP (Cyclic Prefix)<sup>\*13</sup>が付加されている。また、本無線フレーム構成は特別スロットと通常スロットで構成されている。通常スロットは、上下リンクにそれぞれ6OFDMシンボルと2OFDMシンボル分のガードタイム<sup>\*14</sup>を設けている。そのため、上下リンクそれぞれで $0.125\text{ms}$ 、合計で $0.25\text{ms}$ のスロット長となる。これにより、伝送時間を短縮することができる。なお、特別スロットは、通常フレームよりも多くの制御信号を含むため、データ信号および繰り返し信号のためのOFDMシンボル数も通常スロットの2倍とし、上下リンクを合計したスロット長が $0.5\text{ms}$ となるように設計されている。特別スロットは、無線フレームごとに1つ含まれる。

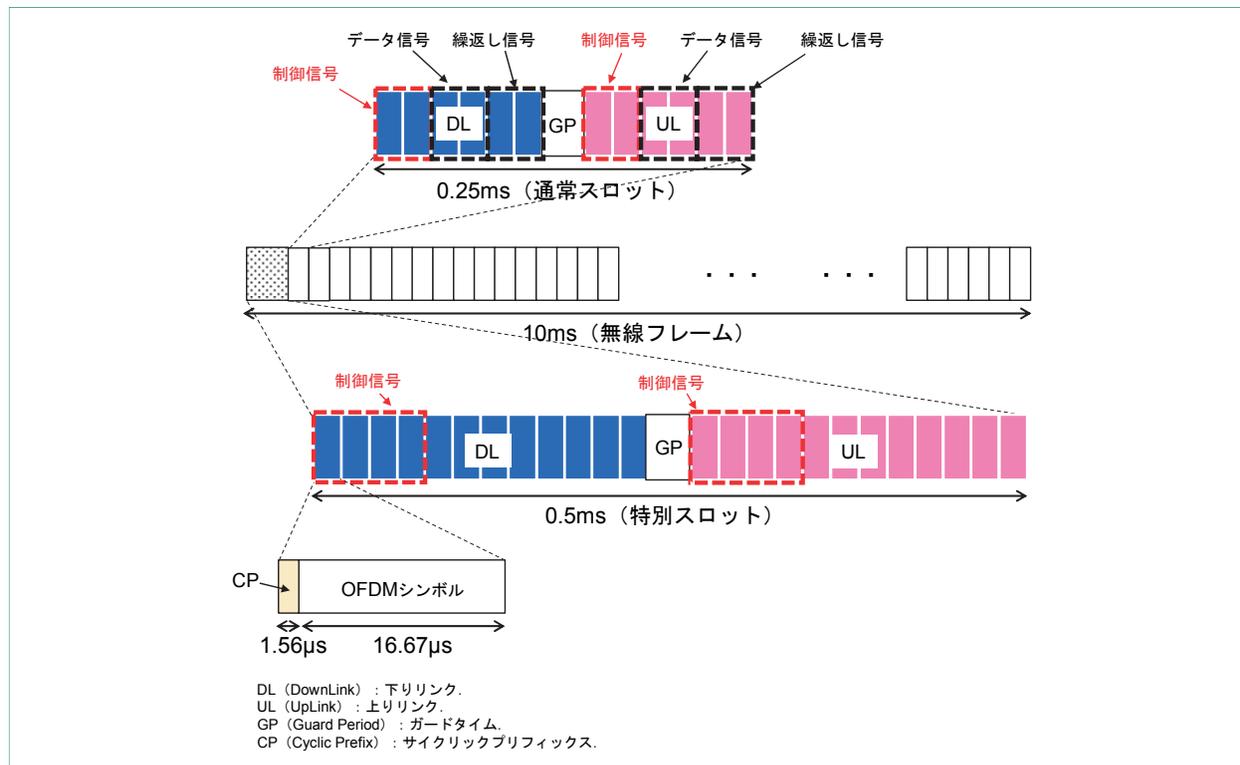


図2 本実験で用いた無線フレーム構成

\*9 OFDM: 狭帯域の直交サブキャリアを用いて伝送を行うマルチキャリア伝送方式。LTE-Advanced, Wi-Fi<sup>®</sup>などの多くの無線通信システムに用いられる。Wi-FiはWi-Fi Allianceの登録商標。  
 \*10 サブキャリア: OFDMなどのマルチキャリア伝送において信号を伝送する個々の搬送波。  
 \*11 Mini-slot: 通常よりも短いスロット長となるように定義された

スロット。  
 \*12 OFDMシンボル: 伝送するデータの単位であり、OFDMの場合は複数のサブキャリアから構成される。各シンボルの先頭にはCPが挿入される。

また、本無線フレーム構成ではTDD方式を採用した。本無線フレーム構成を用いることにより、0.125msごとに下りリンクと上りリンクが切り替わるためACK/NACKなどのフィードバック信号を早いタイミングで送信することができ、再送に要する時間を短縮している。LTE-AdvancedのTDD方式においては、信号を送信してから再送までに約10～11msを要するが、本無線フレーム構成を用いた場合は約0.75～1msまで短縮することができる。

### 3.2 繰返し信号の送信

前述のように、再送によりパケット受信成功確率を改善することができるが無線区間遅延が長くなってしまふ。そこで、NACKなどのフィードバック信号を送信する前にあらかじめ繰返し信号を送信することによってもパケット受信成功確率を改善することが可能である。同じ信号を複数回送信するため伝送効率低下してしまうが、無線区間遅延が増加することなくパケット受信成功確率を改善することができる。本実験で用いた無線フレーム構成では、下りリンクおよび上りリンクの最初の2OFDMシンボルを制御信号、次の2OFDMシンボルをデータ信号のために用いる。そして、データ信号の次の2OFDMシンボルは繰返し信号の送信のために用いる。

### 3.3 マルチアンテナによるダイバーシチ技術

マルチアンテナを用いたダイバーシチ技術<sup>\*15</sup>もパケット受信成功確率を改善する手段の1つである。ダイバーシチ技術を適用することにより、マルチパス環境下でのパケット受信成功確率の低下を抑えることができる。本実験では、基地局では8本、移動局では2本のアンテナを用いた送信アンテナダイバーシチ技術を適用している。送信アンテナダイバーシチ技術として、2本のアンテナによる構成のSFBC (Space Frequency Block Coding)<sup>\*16</sup>と呼ばれる方式 [7] を適用した。なお、基地局では、SFBCにより出力された2つの信号をそれぞれ異なる4本のアンテナで送信し、合計8本のアンテナを用いた。

## 4. URLLCの屋外実験

ドコモでは、URLLCに関する屋外実験をファウエイと共同で進めてきた。その実験概要と結果について解説する。

### 4.1 実験概要

本実験は横浜みなとみらい21地区にて実施した。実験装置の外観を図3に示す。基地局のRF (Radio frequency)<sup>\*17</sup>ユニット、IF (Inter frequency)<sup>\*18</sup>

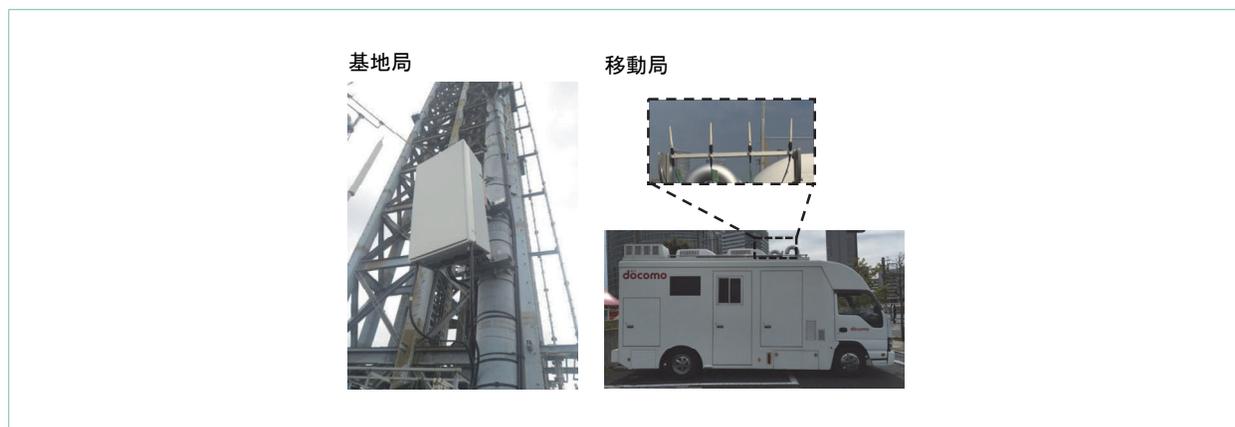


図3 実験装置の外観

\*13 CP：OFDMシンボルの先頭に設けられるガード区間。前のOFDMシンボルの遅延波およびサブキャリア間の直交性崩れに起因するシンボル間干渉の影響を低減することができる。

\*14 ガードタイム：TDD方式を用いる場合に設けられる時間。伝搬遅延により下り信号と上り信号が衝突してしまうことを防止する。

\*15 ダイバーシチ技術：複数の互いに相関の低い受信波を合成また

は選択することにより、フェージングによる受信レベルの落込みを低減する技術。

\*16 SFBC：送信ダイバーシチ技術の1つで、2つの送信アンテナの隣接するサブキャリア間でAlamouti符号化を用いて、周波数およびアンテナ間の符号化を行うことにより、最大比合成に相当するダイバーシチ利得を得る方式。

ユニットはビルの屋上に設置され、基地局アンテナ高は約108mである。基地局のベースバンド\*19ユニットなどはビル内に設置され、光ファイバを用いてIFユニットに接続している。一方、移動局のアンテナは電波測定車の上に設置され、アンテナ高は約3.2mである。その他の移動局装置は電波測定車内に設置した。

実験装置諸元を表1に示す。本実験は、4.5GHz帯の20MHz幅を用いて実施し、パケットサイズに応じて異なる変調符号化方式（MCS：Modulation and Coding Scheme）\*20を設定して測定を行った。測定するパケットサイズは32, 50, 100, 200bytes

とした。

基地局から見た実験環境を図4に示す。実験は電波測定車を静止して行う試験と、移動しながら行う試験を行った。静止試験は図4の通信距離が異なる地点A, B, C, および基地局から電波測定車までの見通しが得られない（見通し外）の地点Dで実施した。また、移動試験で使用した走行コースも併せて図4に示す。試験時の移動は時速25kmとした。

## 4.2 実験結果

本実験では、3GPPにおけるURLLCの要件を達成した最大のパケットサイズを評価した。実験結果を

表1 実験装置諸元

主要諸元	基地局	移動局
中心周波数	4.66GHz	
システム帯域幅	20MHz	
信号波形	Filtered-OFDM	
OFDMサブキャリア間隔	60kHz	
OFDMシンボル長	16.67 $\mu$ s	
スロット長	0.125ms	
ガードタイム	31.25 $\mu$ s	
CP長	1.56 $\mu$ s	
チャンネル符号化	Polar符号	
MIMOモード	SFBC	
MIMOストリーム数	1	
アンテナ素子数	8	2
アンテナチルト角	16.4°	0°
アンテナ設置高	108m	3.2m
最大送信電力	46dBm	23dBm
トラフィックモデル	同一サイズのパケットを一定間隔で送信	
パケットサイズ	32, 50, 100, 200bytes	

Polar符号：通信路に対する反復的な操作により生じる通信路分極を利用した通信路符号化方式。

\*17 RF：無線通信の搬送波に用いられる周波数の信号および電波のこと。

\*18 IF：送信機または受信機において搬送波の周波数帯に変換する際の中間周波数のこと。

\*19 ベースバンド：無線信号の搬送波への変調前や復調後の信号帯域。

\*20 変調符号化方式（MCS）：適応変調を行う際にあらかじめ決めておく変調方式と符号化率の組合せ。



図4 実験環境

表2にまとめる。

(1) 静止試験 (見通し内)

静止試験では、通信距離が約0.33kmの地点Aおよび約0.8kmの地点Bにおいて、下りリンクおよび上りリンク共に200bytesのパケットを1ms以下の無線区間遅延を満足しながら伝送し、99.999%以上のパケット受信成功確率を達成できた。さらに、通信距離が約1.0kmの地点Cにおいては、100bytesのパケットで同様にURLLCの要件を達成した。このように、広範囲にわたって「高信頼」かつ「低遅延」な通信を実現可能なことを実証することができた。

なお、地点Cにおいて200bytesによる要件達成ができなかった要因はSNR (Signal to Noise Ratio)<sup>\*21</sup>が十分に得られなかったためである。本無線フレーム構成では、1つのパケットを1つのスロットで送信し

なければ無線区間遅延が1ms以下とならない。ところが、地点Cにおいて200bytesのパケットを1つのスロットで送信するために必要なMCSを用いた場合、SNRが十分でないためにパケット受信成功確率が低下した。一方、パケット受信成功確率が低下しないMCSを設定した場合には、200bytesのパケットを複数のスロットで送信しなければならず、その結果、無線区間遅延が1msを超えてしまった。このように、URLLCにおいてはSNRとパケットサイズを考慮してMCSを選択する必要がある。多くの無線システムには、SNRに応じて適応的にMCSを切り替えるリンクアダプテーション技術<sup>\*22</sup>が採用されている。しかし、URLLCにおいて適応的にMCSを切り替える場合には、従来とは異なり、SNRだけでなくパケットサイズなども考慮して

\*21 SNR：雑音の電力に対する所望信号の電力の比。

\*22 リンクアダプテーション技術：無線環境に応じてMCSを選択する機能。良好な場合は高い伝送レートとなるMCSを、劣悪な場合は低い伝送レートとなるMCSを選択する。

表2 実験結果

端末条件	基地局からの距離	送信したパケットデータ量 (最大値)	無線区間遅延時間	送信成功率
静止 (見通し内)	約0.33km	200bytes	0.5~0.7ms	99.999~100%
	約0.8km	200bytes		
	約1.0km	100bytes		
静止 (見通し外)	約0.35km	下り：200bytes 上り：100bytes		
移動 (時速25km)	約0.3~0.6km	100bytes		

MCSを選択しなければならない。このように、URLLCの特性向上のためにはMCSの選択アルゴリズムの改良が必要である。加えて、無線フレーム構成の改良も必要である。

#### (2)静止試験（見通し外）

見通し外でマルチパスが観測された環境の地点Dにおいても下りリンクで200bytes、上りリンクで100bytesのパケットを送信することにより、URLLCの要件を達成することができた。上りリンクにおいては、下りリンクよりも送信電力が小さかったことやマルチパスの影響によるSNRの変動により、200bytesのパケットを用いてURLLCの要件が達成できなかったと考えられ、無線環境によってURLLCとして送信可能な情報量が制限されることが分かった。今後、URLLCを用いるサービスを面的に展開することを想定すると、送信可能な情報量の上限やカバレッジを明らかにしていくことがサービス提供に向けて重要になると考えられる。

#### (3)移動試験

移動試験では街路樹などによる遮蔽や走行方向の変化があったにも関わらず、下りリンクおよび上りリンクともに100bytesのパケットを用いてURLLC

の要件を達成することができた。本実験により、街中を自動車などで走行する場合でもURLLCを実現できることを実証し、自動運転などへの適用可能性を示すことができた。

## 5. あとがき

本稿では、5Gのユースケースの1つであるURLLCの概要およびドコモが行ってきた屋外実験について解説した。本実験により、URLLCに要求される「高信頼」と「低遅延」を同時に実現できることを実証した。しかし、URLLCを安定して提供するためには、さらなる無線フレーム構成や制御アルゴリズムなどの改良が必要である。また、将来のサービスに、柔軟に対応していくためには、より大きな情報量をURLLCの要件を満足しながら伝送できることが望ましい。さらに、伝送可能なカバレッジについても明らかにしていく必要もある。今後は、今回の屋外実験の結果を踏まえてこれらの課題を解決し、URLLCの実現とURLLCを用いた新たなサービスの創出をめざしていきたい。

## 文献

- [1] Recommendation ITU-R M.2083-0: "IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," Sep. 2015.
- [2] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus and M. Fallgren: "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project," IEEE Communication Magazine, Vol.52, Issue 5, pp.26-35, May 2014.
- [3] NGMN: "5G White Paper," Feb. 2015.
- [4] 3GPP TR 38.913: "Study on scenarios and requirements for next generation access technologies (Release 14)", Oct. 2016.
- [5] 武田, ほか: "5Gにおける物理レイヤ要素技術と高周波数帯利用に関する検討状況," 本誌, Vol.25, No.3, Oct. 2017.
- [6] 3GPP R1-1609664: "Comparison of slot and mini-slot based approaches for URLLC," Oct. 2016.
- [7] M. Torabi, S. Aissa and M. R. Soleymani: "On the BER performance of Space-Frequency Block Coded OFDM systems in fading channels," IEEE Transaction on Wireless Communications, Vol.6, Issue 4, Apr. 2007.