

モバイルWiMAXにおける  
上位層プロトコル特性を考慮した  
OFDMA リソース割り当て手法に関する研究



三重大学 工学研究科 電気電子工学専攻  
奥田 武彦



# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 無線ネットワークの現状	1
1.2 研究の背景	2
1.3 研究の目的	5
1.4 本論文の構成	6
<b>第 2 章 モバイル WiMAX</b>	<b>7</b>
2.1 はじめに	7
2.2 モバイル WiMAX の物理層	8
2.2.1 OFDM	9
2.2.2 OFDMA	10
2.2.3 サブチャネルの配置	12
2.2.4 フレーム構成	13
2.3 OFDMA におけるリソース割り当て	15
2.3.1 マルチパスフェージング	16
2.3.2 従来の無線リソース割り当てアルゴリズム	17
<b>第 3 章 TCP(Transmission Control Protocol)</b>	<b>20</b>
3.1 はじめに	20
3.2 トランスポート層	21
3.3 UDP	22
3.4 TCP	23



3.4.1	再送制御 . . . . .	24
3.4.2	フロー制御 . . . . .	24
3.4.3	輻輳制御 . . . . .	26
3.5	セグメント喪失に対する TCP の特性 . . . . .	28
<b>第 4 章</b>	<b>TCP の特性を考慮した OFDMA リソース割り当て法</b>	<b>30</b>
4.1	はじめに . . . . .	30
4.2	TCP の特性を考慮した OFDMA リソース割り当て法 . . . . .	31
4.2.1	優先度の決定式 . . . . .	31
4.2.2	リソース割り当て方式 . . . . .	32
4.3	数値例 . . . . .	35
4.3.1	シミュレーション諸元 . . . . .	35
4.3.2	TCP ファストリトランスミット率 . . . . .	38
4.3.3	TCP タイムアウト率 . . . . .	39
4.3.4	ユーザスループット . . . . .	40
4.3.5	システムスループット . . . . .	41
<b>第 5 章</b>	<b>結論</b>	<b>42</b>
5.1	本研究のまとめ . . . . .	42
5.2	今後の課題 . . . . .	42
	<b>参考文献</b>	<b>44</b>
	<b>謝 辞</b>	<b>47</b>



## 目 次

2.1 OFDM シンボルの作成 . . . . .	9
2.2 FDM と OFDM の周波数軸上の関係 . . . . .	11
2.3 シングルキャリア伝送とマルチキャリア伝送の遅延波への耐性 . . . . .	11
2.4 WiMAX におけるサブキャリア, サブチャネルの配置例 . . . . .	12
2.5 分散型サブキャリア配置法 . . . . .	13
2.6 隣接型サブキャリア配置法 . . . . .	13
2.7 OFDMA/TDD におけるフレーム構成例 . . . . .	14
2.8 OFDMA におけるスケジューリング . . . . .	15
2.9 マルチパスフェージング . . . . .	16
2.10 UEPS アルゴリズムにおける TUF 特性 . . . . .	19
3.1 OSI 参照モデル . . . . .	21
3.2 UDP データグラムのフォーマット . . . . .	22
3.3 TCP セグメントのフォーマット . . . . .	23
3.4 確認応答 . . . . .	24
3.5 再送 . . . . .	24
3.6 スライディングウィンドウ . . . . .	25
3.7 PER に対する TCP スループット特性 . . . . .	29
4.1 想定システム . . . . .	32
4.2 リソース割り当ての例 . . . . .	34
4.3 TCP ファストリトランスミット率 . . . . .	38



4.4 TCP タイムアウト率 . . . . .	39
4.5 3 ユーザ時のユーザスループット . . . . .	40
4.6 システムスループット . . . . .	41



# 第1章

## 序論

### 1.1 無線ネットワークの現状

近年の無線通信技術の発展に伴ない，無線ネットワーク上でも様々なサービスが提供されつつある．また，国内のモバイル端末からのインターネット利用者数は，平成20年末には7506万人に上り，年々増加する傾向にある [1]．

現在普及している代表的な無線ネットワークシステムとして，無線 LAN システムと携帯電話システムがあげられる．無線 LAN システムでは，IEEE802.11 規格に準拠した製品が多数販売されており，近年は IEEE802.11 規格 [2] の拡張規格である IEEE 802.11a/g 規格 [3] [4] 及び IEEE802.11n 規格 [5] の製品も順調に普及を続けている．IEEE802.11 規格では当初 1M[bps] の通信速度が提供されていたが，IEEE802.11a/g では 54M[bps] の通信速度が提供されるようになり，IEEE802.11n では 300M[bps] の通信速度が提供される製品も発売されている．このように，無線 LAN システムは急激に通信速度が増加しており，身近なシステムとなりつつある．なお，無線 LAN システムは無線免許を取得する必要がない周波数帯域で運用されており，送信電力も法律により低い値に制限されている．そのため，無線 LAN システムの通信可能距離は約 100m 程度であり，駅，空港，ホテル，事務所，家庭など限られた空間に通信サービスを提供するシステムとなっている．

一方，携帯電話網システムは無線 LAN システムとは異なり，無線免許を必要とする専用の周波数帯域を利用し，無線 LAN と比較してより大きい送信電力で送信を行うことが可能である．そのため，通信距離は数 km と長く，1 基地局が通信



サービスを提供可能となる通信エリアは無線 LAN と比較して非常に広がる。携帯電話網システムは歴史的にアナログ無線通信技術を採用していた第 1 世代システム、デジタル無線通信技術を採用した第 2 世代システム、デジタル無線通信技術の中でも CDMA を採用した第 3 世代システムが既にサービスが行われてきた。また、近年第三世代システムの高速化として 3.5 世代システムのサービスが開始されており、3.5 世代システムでは最大 14.4M[bps] の通信速度を達成している [6]。

このように、無線 LAN システムと携帯電話網システムでは通信速度の高速化が試みられてきている。しかしながら、近年のインターネットの爆発的な普及に伴ない、無線ネットワークにおいても動画像のダウンロードなど大容量通信に対する需要が急激に増えつつあり、無線ネットワークの更なる高速化が望まれている。

このような需要増に対応する方式が検討されており、次世代規格として LTE(Long Term Evolution) や WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access) [7] [8] と呼ばれるシステムが提案されつつある。これらのシステムでは、既存の携帯電話網システムと同等の通信可能範囲を保ちつつ、100M[bps] 以上の伝送速度を提供することを目的にされている。また、無線通信方式として、直交周波数分割多元接続 (OFDMA:Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) など第四世代移動通信システムに近い技術を用いることから、3.9 世代とも呼ばれ注目を浴びている。

## 1.2 研究の背景

近々の次世代無線通信規格である LTE と WiMAX は、前述のように両方式とも通信方式として OFDMA を採用していることや、オール IP(Internet Protocol) ネットワークであるなど多くの共通点がある。一方で、LTE が新しい携帯電話網システムの規格であるのに対して、WiMAX は、常時接続を前提としたデータ通信専用の規格であるために、主としてノート PC での利用が想定されているなどの差異もある。そのため、両方式の扱う主なトラフィックは、LTE が VoIP(Voice over Internet Protocol) による音声通信、WiMAX ではインターネット接続など、HTTP(HyperText Transfer Protocol) や FTP(File Transfer Protocol) を用いたデータ通信となることが予想される。それぞれのトラフィックで用いられるデータリンク層プロトコルは、後の章で詳述するが、前者が UDP(User Datagram Protocol) と呼ばれる信頼性は低



いが伝送が高速, 後者は TCP(Transfer Control Protocol) という伝送の信頼性が高く, UDP よりも低速であるという特徴がある。

LTE や WiMAX における無線通信方式である OFDMA 方式は, 直交周波数分割多重方式 (OFDM: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) を多元接続に応用した技術である。OFDM では, 周波数軸上に直交関係を有する複数の狭帯域サブキャリアを用いて並列伝送を行う方式であり, 周波数利用効率が従来の単一キャリア伝送方式と比べて優れている。OFDMA では, 上記の狭帯域サブキャリアの複数サブチャネルとして束ね, 各サブチャネルを異なるユーザにそれぞれ割り当てを行うことで, OFDM が利用する周波数帯域を複数のユーザで共有する多元接続方式である。

無線通信方式の中で OFDM 及び OFDMA は次世代の通信方式として非常に着目されている一方で, 解決すべき課題も多数存在しており, 現在様々な研究が続けられている。これらの研究は大別して, 物理信号を取り扱う物理層の研究と制御方式を取り扱うデータリンク層の研究となる。

物理層の大きな課題の一つとしてキャリア間干渉 (ICI: Inter-Carrier Interference) の除去, 低減が挙げられる。OFDM ではサブキャリアが互いに直交関係にあるために, 高速フーリエ変換アルゴリズムを用いて容易に分離し, 復調することが可能となっている。しかし実システム環境ではしばしば直交性が崩れ, 各サブキャリアが他のサブキャリアの干渉成分となり, 著しく復調特性が劣化する。この現象を ICI と呼び, 次のような原因で発生する。無線通信システムにおいては送受信機が離れているため, 独立した発振器を用いなくてはならない。そのため, 送受信機間の発振周波数の若干の差 (周波数オフセット) が, 直交性を崩すこととなり, ICI が発生する。また, ICI はシンボル間干渉 (ISI: Inter-Symbol Interference) によっても発生する。ISI はマルチパス環境において大きな遅延波が発生した場合, 遅延波が, 遅延せずに届いた後続シンボルの干渉成分となり生じる。この際に, サブキャリア間の直交性も崩されるため, ICI も発生する。

これらの対策として, 周波数オフセットの問題では, 既知の信号であるプリアンプルを用いて周波数オフセットの推定, 補償を行う方式などが提案されている [9] [10]。一方 ISI に対しては, シンボル毎にガードインターバルと呼ばれる冗長信号を付加するなどしてマルチパスフェージングの影響に耐性を持たせている。



しかし、ガードインターバル長は短い方がシステム効率が高くなる一方で、ガードインターバル長を超えた遅延波が存在する場合には ISI を生じてしまう。そのため適切なガードインターバル長や、ガードインターバル長を超える遅延波が存在する場合の対策が検討されている [11] [12]。

また OFDM では、周波数軸上で直交関係にある多数の信号を離散フーリエ変換 (DFT :Discrete Fourier Transform) し、時間領域の信号としたものが送信信号となる。そのため、周波数軸上の各信号の位相が一致した場合には合成波の振幅は大きく、逆の場合は非常に小さくなる。したがって、全使用帯域を単一の信号とするシングルキャリア伝送と比較して、ピーク対平均電力比 (PAPR: Peak-to-Average Power Ratio) が非常に大きくなり、電力増幅の際に非線形ひずみが生じる問題がある。この問題に対しては、クリッピングと呼ばれるピーク信号のカットとフィルタリングを繰り返す手法 [13] [14] や、PAPR が低減するように各サブキャリアに位相回転を加える手法 [15] [16] などが提案されている。

一方データリンク層では、メディアアクセス制御 (MAC: Medium Access Control) 副層が議論の中心となっている。MAC 副層では、複数のユーザがどのように通信媒体にアクセスするかが規定される。また、OFDMA ではユーザへの無線リソースの割り当てを基地局で集中的に行い、基地局の MAC 副層において、割り当てユーザの選択、変調レートの決定の機能を担う。したがって、OFDMA のデータリンク層における課題は、ユーザへの無線リソースの効率的な割り当てである。

従来の OFDMA リソース割り当て方式として、MaxCIR 法、ラウンドロビン法やプロポーションアルファネス (PF) 法といった方式がよく知られている [17] [18] [19]。MaxCIR 法では物理層の指標である SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) を基準として、最も瞬時 SINR 値の大きいユーザにリソースを割り当てる。受信環境の良いユーザに優先的に無線リソースを割り当てるため、より多値の変調方式を用いることができ、高い周波数利用効率を得ることができる。反面、SINR 値の小さいユーザに対するリソース割り当て機会は減少するため、ユーザ間の公平性に問題がある。ラウンドロビン法では、各ユーザに順にリソースの割り当てを行う。そのため公平性という観点においては優れているが、送信効率の悪い低 SINR のユーザにもリソースを等しく与えるので、周波数利用効率は低いものとなる。プロポーションアルファネス法では、瞬時 SINR と平均 SINR の比が最も良



好なユーザに無線リソースを割り当てる．ラウンドロビン法と同様に公平性に重点をおいたスケジューリング法であるが，ユーザの受信環境の平均値に対し瞬時値が高くなる場合に割り当てが行われやすくなるため，ラウンドロビン法と比較して周波数利用効率に優れている．これら下位層の指標を用いるスケジューリング方式は，多くの評価がなされ，それぞれの長所を活かした複合型の方式も提案されている [20]．

また近年では，異なる QoS(Quality of Service) 要求を持つトラフィックを同時に扱うためのスケジューリング方式の研究もなされている．QoS を考慮したスケジューリングでは主に，許容遅延時間や最低伝送レートといったものを指標としており，それらを満たすようにスケジューリングが行われる．一例を挙げると，音声やストリーミング配信など遅延特性に厳しいリアルタイムトラフィックに対しては，許容遅延時間が近づくに従い，割り当ての優先度を増大させ，www(world wide web) や mail トラフィックについてはほぼ一定の優先度を持たせる方式が提案されている．このような優先度付けをすることにより，リアルタイムトラフィックの QoS を満たしつつ，非リアルタイムトラフィックについても良好なスループット特性が獲得できる [21] [22]．このようにこれまでも優先度の指標として物理層の伝送速度や，上位層の QoS といったものを使用したスケジューリング法がいくつか提案されている．

### 1.3 研究の目的

先に述べたように，従来方式の OFDMA におけるリソース割り当て方式では，割り当ての指標には主にトラフィックの QoS や，下位層である物理層の SNR(Signal to Noise Ratio)，BER(Bit Error Ratio) 等といったものが使用されてきた．ところが，上位層プロトコルの中には UDP のように，輻輳制御を行わず，伝送誤り率通りの性能が上位層においても期待できる一方で，そうでないプロトコルも存在する．一例を挙げると，TCP はセグメント損失に基づいて輻輳制御を行うことから，伝送誤り率と伝送速度に非線形な特性を持つ複雑な動作をするプロトコルであることが知られている [23] [24] [25]．従って，従来のリソース割り当て方式において TCP を用いるトラフィックが印加された場合，TCP の持つ通信特性を考慮しておらず，



過剰な輻輳制御が発生し、伝送速度を意図せず低下させてしまう。つまり、リソース割り当てを行った際に期待したユーザスループットが得られず、ユーザレベルの伝送速度の観点においては検討が不十分であるといえる。

そこで本論文では、OFDMA における無線リソースの割り当ての際に、上位層プロトコルの特性を考慮し、ユーザ及びシステムスループットの改善をすることを目的とする。また本論文では、上位層プロトコルとしてインターネット接続において特に使用頻度の高い TCP、通信システムとしてデータ通信を主として扱うモバイル WiMAX を想定し、物理層の特性だけでなく、TCP で達成されるスループットを指標としてリソース割り当てを行う方式を提案する。提案方式では、TCP の伝送誤りに対する伝送速度を考慮することで、余剰な輻輳制御を抑制することにより、TCP による伝送速度の低下を軽減する。評価結果より、提案方式がユーザ及びシステムスループットの改善が可能であることを示す。

## 1.4 本論文の構成

本論文は次の章で構成される。第 2 章では、モバイル WiMAX を構成する技術について述べ、モバイル WiMAX ではどのような手順で通信を行うのかについて述べる。

第 3 章では、インターネット接続に用いられている TCP と呼ばれるトランスポート層プロトコルの動作原理について述べる。

第 4 章では、WiMAX におけるの新たな OFDMA リソース割り当て法の提案を行う。提案方式では、上位層プロトコルである TCP の特性を考慮することで、ユーザレベルでの伝送特性を改善する。計算機シミュレーションによる、提案法の特性評価結果を示す。

第 5 章では、本論文の総括をし、今後の課題についてまとめる。



## 第2章

# モバイル WiMAX

### 2.1 はじめに

本章では，本研究の想定システムであるモバイル WiMAX の概要についての説明を行う．また，いくつかの主要技術，関連要素について更なる説明を行う．WiMAX は無線 MAN(Metropolitan Area Network) に分類され，特定の都市内の広域エリアに対してブロードバンドサービスを提供することを目的に当初設計が開始されたシステムである．しかしながら，近年の移動通信技術の急激な発展に伴ない，移動環境にも適応可能なシステムの開発も行われている．このように，WiMAX には大きく分けて，固定 WiMAX とモバイル WiMAX の2つの規格が存在する．固定 WiMAX は IEEE802.16-2004 規格として標準化が行われている．また，ユーザは特定の場所に静止している状態を想定しており，ユーザは通信事業者の基地局と接続を行う．モバイル WiMAX は，移動通信環境で必要とされる機能を IEEE802.16-2004 規格に追加した 802.16e 規格として標準化が行われており，時速 120km までのユーザの移動を想定している．



## 2.2 モバイル WiMAX の物理層

モバイル WiMAX のシステムプロファイルを規定した 802.16e 規格は, 802.16 ワーキンググループ (WG: Working Group) により, 時速 120km 程度の移動通信をサポートするために, 固定ワイヤレスアクセス (FWA: Fixed Wireless Access) の規格である 802.16-2004 規格を修正したものである。

モバイル WiMAX では, マルチパスにより発生する周波数選択性フェージングに耐性を持つ OFDMA 方式を無線通信方式として採用している。また, 無線チャネル状態に合わせて適切な帯域利用を行うために, 802.16e 規格の OFDM では可変の FFT サイズを利用可能な仕様となっている。

OFDM の送信機では, 図 2.1 に示すように, まず入力データ系列 (直列データ) を直並列変換機により, サブキャリアのデータ系列に分割する。次に 1 次変調として, 分割したデータ系列をサブキャリア毎に複素平面上にマッピング, つまりサブキャリア変調を施す。サブキャリア変調は, QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) や QAM (Quadrature Amplitude Modulation) といったシングルキャリア方式と同じ処理が用いられ, これらの方式ではサブキャリアの振幅及び位相を変化させることによってデータを伝達する。サブキャリア変調の後に, 周波数領域上のサブキャリアを IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) により 2 次変調を行い, 時間領域の信号とする。この 2 次変調する際に使用する IFFT 信号処理における並列信号処理数を FFT サイズという。さらに ISI 対策として, ガードインターバル (GI) と呼ばれる冗長信号を付加し, OFDM シンボルが作られる。

WiMAX では, 1 次変調の方式として BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM をサポートしている。また符号化についても,  $1/2$ ,  $2/3$ ,  $3/4$  と複数の符号化率をサポートしており, 変調方式と併せて, 電波の受信状況に応じて, 変調・符号化方式を選択して対応する適応変調を規定している。

OFDMA においてサブキャリアをグループ化することをサブチャネル化と呼ぶが, モバイル WiMAX の物理層では, 3 種類のサブキャリアの配置に基づくサブチャネル配置法が規定されている。FUSC (Full Usage of Subchannels) と PUSC (Partial Usage of Subchannels) は, 物理的に分散したサブキャリアの集合でサブチャネルを構成する方法であり, 分散型サブキャリア配置法と呼ばれる。一方, AMC (Adaptive



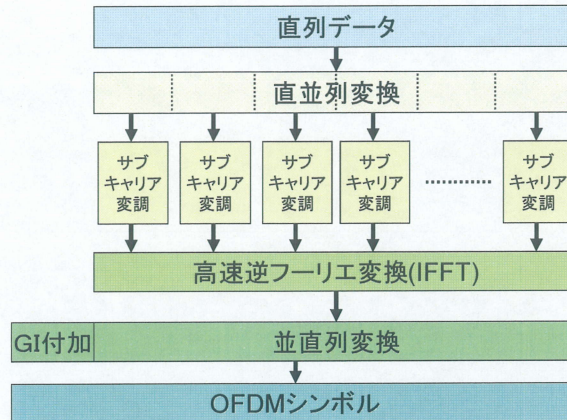


図 2.1 OFDM シンボルの作成

Modulation and Coding) は、物理的に隣接するサブキャリアの集合でサブチャネルを構成するため、隣接型サブキャリア配置法と呼ばれる。分散型サブキャリア配置法は高速移動での利用に適しており、隣接型サブキャリア配置法は固定又は低速移動での利用に適している。

さらに、モバイル WiMAX には、送受信機において複数のアンテナを用いる MIMO(Multiple Input Multiple Output) 等のマルチアンテナ技術がオプションとして採用されている。MIMO を用いた通信では、同一周波数上において、複数のアンテナから異なるデータストリームを送信する。そして、複数のアンテナで受信された電波は、マルチパスフェージングの影響により空中で独立した伝送路を構成する。そのため通常は同一周波数を用いた場合、個別に分離した受信を困難なものにするが、予め伝送路特性を把握することにより、各々の分離を可能にする。

### 2.2.1 OFDM

OFDM は多重化方式の一種であり、周波数軸上で互いに直交関係を有する複数のサブキャリアを多重化する方式である。従って OFDM は FDM(Frequency Division Multiplexing) の一形態と考えることも可能である。図 2.2 に、FDM と OFDM の周波数軸上の関係を示す。一般に無線通信では情報が含まれているメインローブ周



辺にサイドローブと呼ばれる信号が発生する。サイドローブが隣接キャリアのメインローブと重なった場合、隣接チャネル干渉が発生する。そのため FDM ではキャリア間にガードバンドと呼ばれる周波数帯域を設けることで隣接チャネル干渉が起らない周波数配置を用いる。一方 OFDM では、多数のサブキャリアが互いに重なり合うように密に配置を行う。また互いに重なり合うサブキャリアの中心周波数において、隣接サブキャリアの信号強度が 0 となるように配置を行うことで、情報が含まれている中心周波数帯域への干渉を防いでいる。このように OFDM ではサブキャリア間にガードバンドを設ける必要がないため FDM と比較して周波数利用効率が高くなる。

また OFDM は、マルチキャリア方式 (広帯域の信号を複数の狭帯域の信号に分けて並列伝送) であるために、前述のマルチパスフェージングに対して良好な特性を示す。同じビットレートで伝送を行う場合、シングルキャリア方式がシンボル長を短くし、伝送の高速化を図るのに対して、マルチキャリア方式では複数のキャリアを用いて、信号を並列伝送し、伝送速度を向上させる。そのためマルチキャリア方式では、図 2.3 に示すように、各キャリアのシンボル長を長く取ることが可能である。したがって、シンボルの先頭部分に設けられるガードインターバルについても、1 シンボルあたりの長さを長く取ることができ、より大きな遅れを持つ遅延波の影響を除去することができる。

なお、ガードインターバルにはサイクリックプレフィックス (CP) とよばれる技術が用いられる。CP では、OFDM 有効シンボルの後半部分のコピーをガードインターバルとして先頭に付加する。仮にガードインターバルを無信号とした場合、干渉波の直交性が崩れるため、ガードインターバルと有効シンボルの切り替え部分において多くの高調波成分が生じる。そのためガードインターバルには、OFDM シンボルが連続した正弦波となるよう CP が用いられる。

## 2.2.2 OFDMA

OFDM は、周波数分割多重 (FDMA: Frequency Division Multiple Access) や時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access) などの多元接続方式と組み合わせて、OFDM/FDMA や OFDM/TDMA として用いられる。一方 OFDMA は、OFDM



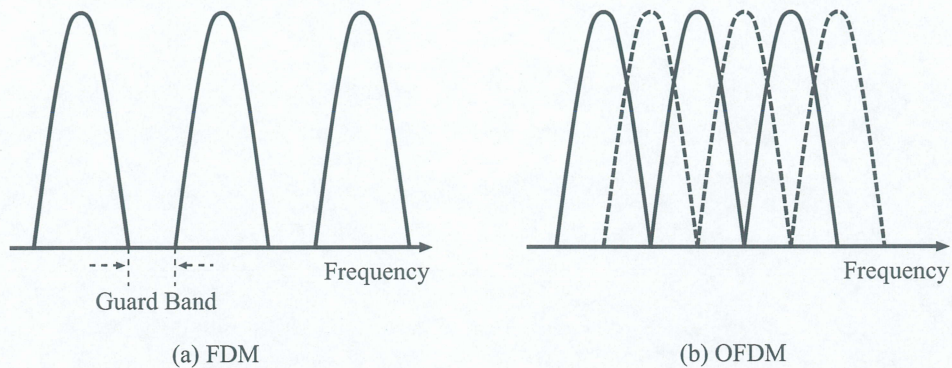


図 2.2 FDM と OFDM の周波数軸上の関係

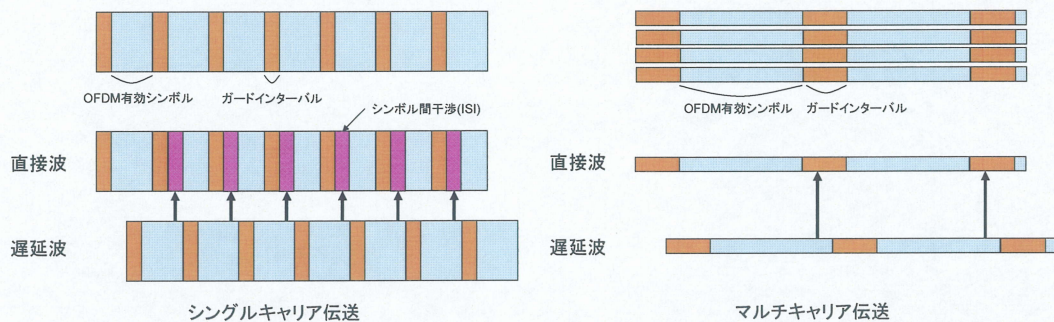


図 2.3 シングルキャリア伝送とマルチキャリア伝送の遅延波への耐性

そのものを応用して多元接続を実現する方式である。一般的に OFDMA が用られる通信システムでは、基地局が複数のユーザとの通信を集中的に管理する。また、OFDMA では特定の複数サブキャリアをサブチャネルとし、すべてのサブチャネルを全ユーザが共有する。さらに、各時刻において基地局が適応的にサブチャネルを各ユーザに割り当てを行い、複数のユーザとの多元接続を実現する。

図 2.4 に、WiMAX における FFT サイズが 2048 の場合の OFDMA サブチャネルの配置例を示す。2048 本のサブキャリアのうち 1536 のサブキャリアをデータ伝送に用いた場合、1 グループを 32 個のサブキャリアとして分割することで 48 グループを生成できる。また、各グループの中から 1 サブキャリアを抽出し、同期確立用のパイロット信号を送信するために、このサブキャリアを利用する。結果として、この条件では 31 サブチャネルを構成することができるため、最大で 31 ユーザが同



時通信が可能となる。OFDMA の利点は、サブキャリア単位でユーザ割り当てを行う事が可能な点である。つまりサブキャリア単位の適応変調・符号化や送信電力制御だけでなく、各ユーザが独立した伝搬環境下にいることを利用して、各サブチャネルを SINR 値の高いユーザに優先的に割り当てることにより、システム全体の通信容量を増大できるということである。

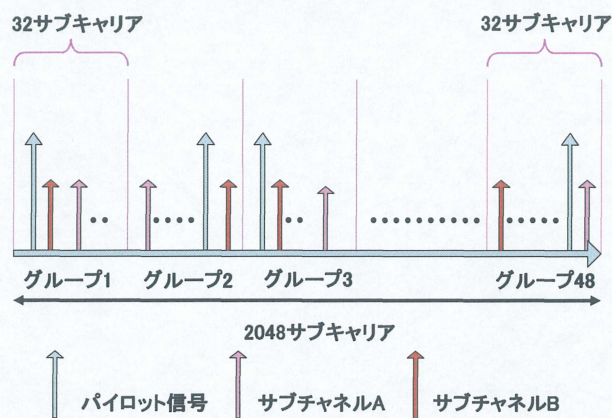


図 2.4 WiMAX におけるサブキャリア, サブチャネルの配置例

### 2.2.3 サブチャネルの配置

モバイル WiMAX においてサブチャネルを構成するサブキャリアの配置法は、PUSC, FUSC と AMC の3つが規定されている。これらは大きく分けて、物理的に分散したサブキャリアの集合で構成する分散型サブキャリア配置と、物理的に隣接するサブキャリアの集合で構成する隣接型サブキャリア配置の2種類がある。図 2.5 に示す PUSC や FUSC のような分散型サブキャリア配置では、周波数ダイバーシティが得られることから、高速移動での利用に適している。一方、固定あるいは低速移動の場合は、チャンネル変動が小さいのため、図 2.6 のような隣接型サブキャリア配置が適している。



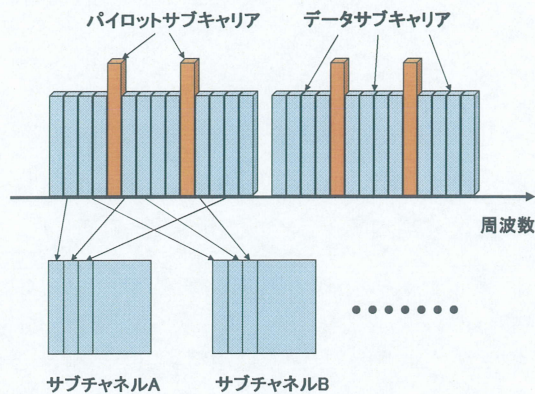


図 2.5 分散型サブキャリア配置法

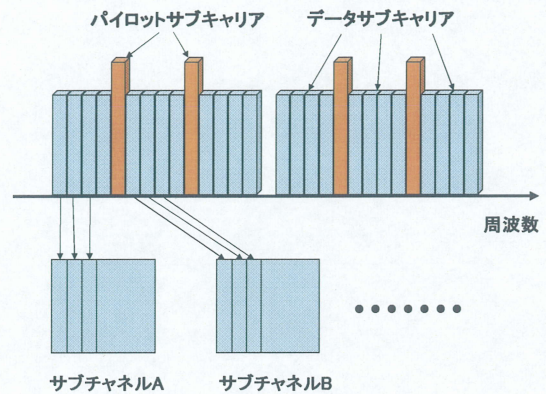


図 2.6 隣接型サブキャリア配置法

#### 2.2.4 フレーム構成

図 2.7 に、複信方式として時分割複信 (TDD: Time Division Duplexing) を用いた場合のモバイル WiMAX のフレーム構成の一例を示す。各フレームは、基地局からユーザへ送信を行うダウンリンクサブフレームと、ユーザから基地局へ送信を行うアップリンクサブフレームから構成される。各サブフレームの間には、TTG(Transmit Transition Gap) と RTG(Receive Transition Gap) というガード時間が設けられている。

各サブフレームは、データ・バーストや制御チャンネルなどいくつかの領域に区切られ、領域を区切る最小単位は、時間軸が OFDM シンボル、周波数軸がサブチャネルとなる。

各フレームの先頭にはプリアンブルが配置される。プリアンブルは1つの OFDM シンボルで構成され、ユーザはこのプリアンブルにより同期を取る。プリアンブルの直後には、フレーム制御ヘッダ (FCH: Frame Control Header) と呼ばれる領域が続く。FCH に続けて、下り無線リソース割り当て情報 (DL-MAP: Downlink Map) が配置される。更にその後、下りデータ・バーストを配置する領域内において、上り無線リソース割り当て情報が送信される。

FCH には、直後に続く DL-MAP 情報の制御情報が正しく読み取れるように、MAP 領域の変調・符号化方式が記述されている。ユーザでは FCH を基に、DL-MAP を復調し、ダウンリンクサブフレーム内のデータバースト領域の割り当て



や、拡張制御情報を得る。また、FCH と DL-MAP については PUSC によるサブチャネル配置が規定されている。DL-MAP と同様に、UL-MAP にはアップリンクサブフレーム内のデータバースト割り当て情報等が記述される。

レンジング領域では、ユーザにおいて帯域要求やレンジングが必要となった場合に使用する領域である。ここで、帯域要求とはデータを基地局に送信するためのデータ領域の割り当てを要求する処理で、レンジングは基地局との同期をとるために行う処理である。

CQICH(Channel Quality Information Channel) 領域は、定期的な CINR(Carrier-to-Interference-plus-Noise Ration) 報告など、物理層の時間応答に厳しい処理に対応するチャネル品質情報を送信するための領域である。

ACK 領域は、HARQ(Hybrid Automatic Repeat Request) と呼ばれる自動再送要求に対する確認・否定応答に使用される領域である。

サウンディング領域では、ユーザが既知のサウンディング信号を基地局に送信することにより、基地局において下りのチャネル状態推定を行うために用いられる。これは無線通信において上りと下りのチャネルに相互関係があるためである。

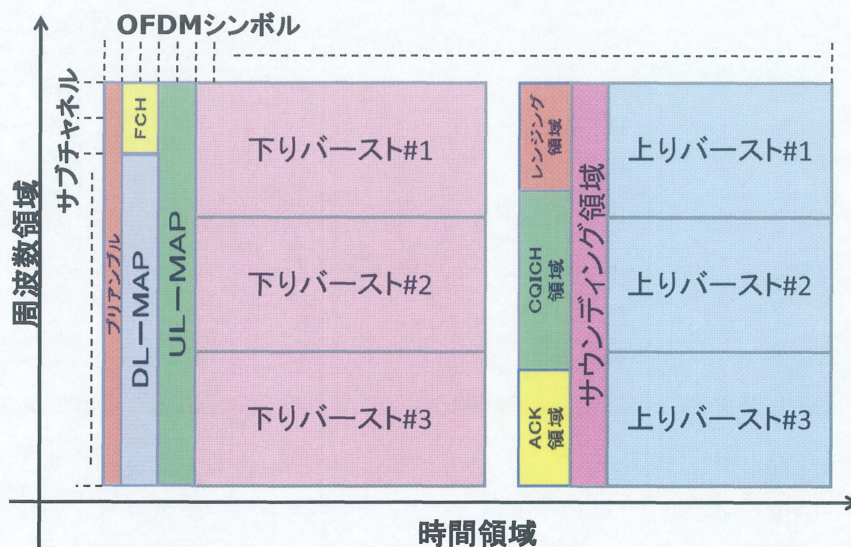


図 2.7 OFDMA/TDD におけるフレーム構成例



## 2.3 OFDMA におけるリソース割り当て

広帯域無線通信では、後述のマルチパスによる周波数領域の受信レベルが変動する周波数選択性フェージングの影響を低減し、無線リソースをいかに利用するかが課題となる。

OFDMA を用いる一般的なシステムでは、基地局が無線リソースの管理を集中的に行う。また、各ユーザは上り回線において、チャネル品質情報 (CQI: Channel Quality Information) をフィードバックする。そしてそれぞれのサブチャネルにおいて、受信品質の良いユーザに対して最適に割り当て、適切な変調・符号化方式を選択することにより、ユーザダイバシティ及び周波数ダイバーシティを得ることができ、無線リソースの効率的な利用が可能となる。

モバイル WiMAX において、ユーザは、フレーム中の CQICH 領域やサウンディング領域にて、ダウンリンクにおける各サブチャネルの受信品質を基地局に報告する。その値を基に基地局では、無線リソースを各ユーザに割り当てる。また、モバイル WiMAX ではユーザ毎だけではなく、上位層で扱うプロトコル毎にコネクションを管理する。そのためスケジューリングにおいても受信品質だけで割り当てを決定するのではなく、VoIP のような途切れが許されないものを優先して FTP を後回しにするなど上位層プロトコルを意識したリソースの割り当てが可能である。

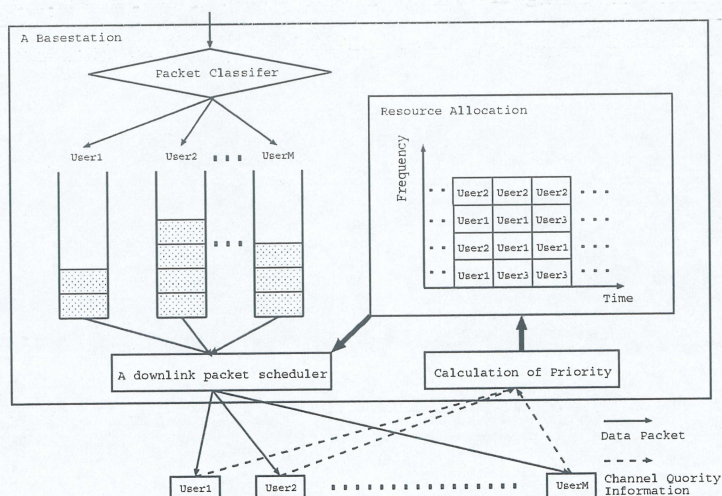


図 2.8 OFDMA におけるスケジューリング



### 2.3.1 マルチパスフェージング

図 2.9(a) のように，無線通信において送信アンテナからの信号は，複数の経路を通して受信アンテナに到来する．送信アンテナから受信アンテナに直接到来する直接波だけでなく，建物の壁や地面などに反射して到来した反射波も全て合成され，受信アンテナで受信される．これらのマルチパス信号は，それぞれ伝搬路が異なるために受信アンテナの入力端において信号の振幅と位相が異なる．したがって入力端において各信号の位相が一致すれば強めあい，逆相であれば弱めあい，受信信号の振幅は大きく変動することとなる．このようなマルチパス信号を受信した場合，遅延が大きく，遅延波のレベルが大きいほど受信性能に与える影響が深刻になる．

また，伝搬路が多数のマルチパスから構成されるために，伝搬路は周波数特性を有する．そのため WiMAX のような広帯域無線通信では，無線信号は帯域内の周波数に応じて伝達特性が変化し，結果として図 2.9(b) に示すように，受信信号の周波数スペクトルが歪むこととなる．この現象は伝搬路がある種のフィルタのような振る舞いをしていることに相当し，周波数に対して選択性をもった伝送特性を有している．加えて，ユーザの移動に伴いこの特性は時間的にも変化し，受信信号は帯域内で異なったフェージングを受ける．このようなフェージングを周波数選択性フェージングと呼ぶ．

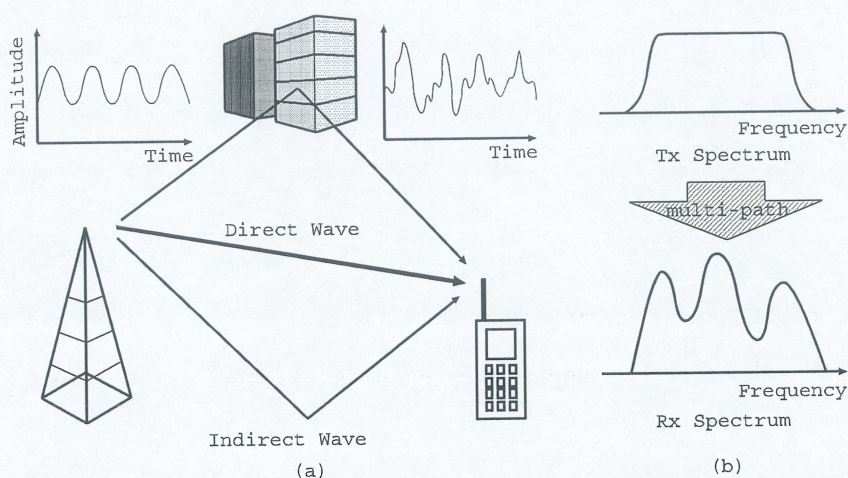


図 2.9 マルチパスフェージング



### 2.3.2 従来の無線リソース割り当てアルゴリズム

前述のように広帯域無線通信では、周波数選択性フェージングの影響を受けるため、OFDMA の各サブチャネルは異なるフェージングを受ける。加えて、各ユーザにの受けるフェージングも無相関であり、それぞれ独立であるとみなせる。そのため、基地局ではマルチユーザダイバーシティ及び周波数ダイバーシティを得るべく、周波数領域におけるスケジューリング(リソース割り当て)を行う。無線リソース割り当てアルゴリズムは、システム容量、ユーザ間の公平性やアプリケーションの QoS など、様々な観点から検討が行われている。以下では、その中でも代表的なものをいくつか解説する。

- ラウンドロビン法

ラウンドロビン法は、もっとも単純なスケジューリングアルゴリズムである。ラウンドロビン法では、各ユーザに順番に無線リソースを割り当てる。そのため、ユーザ間の割り当て機会の公平性という点で最も優れた方式である。しかしながら、各ユーザのチャネル品質、利用可能な伝送レートは考慮しておらず、通信速度の観点からは公平とは言えない。したがって、システム容量の観点からも非効率的であるといえる。

- MaxCIR 法

MaxCIR 法では、時刻  $t$  におけるユーザ  $i$ 、サブチャネル  $k$  のリソース割り当て優先度  $P_{ki}$  を次のように表し、 $P$  を最大とするユーザにサブチャネルの割り当てを行う。

$$P_{tki} = S_{tki} \quad (2.1)$$

$S$  は SINR を表す。つまり、 $P_{tki}$  は時刻  $t$  におけるユーザ  $i$ 、サブチャネル  $k$  の瞬時 SINR そのものであり、MaxCIR 法では、瞬時 SINR が最も良好なユーザに無線リソースが割り当てられる。すなわち、マルチユーザダイバーシティを最大とすることにより、システム容量を最大とする。ただし、瞬時 SINR のみに依存して割り当てを行うため、チャネル状況の悪いユーザへの割り当てが行われない不公平性が残る。特にセルエッジなどに存在するユーザは、割り当て機会がほとんど割り当てられることがなく、基地局のカバレッジエリア減少にも繋がる。



- PF 法

PF 法のリソース割り当て優先度  $P$  は次のように表され、 $P$  を最大とするユーザにサブチャネルの割り当てを行う。

$$P_{tki} = \frac{S_{tki}}{\overline{S_{tki}}} \quad (2.2)$$

$\overline{S_{tki}}$  は、時刻  $t$  における平均 SINR を表す。ユーザのチャネル品質の平均値に対して瞬時値が大きくなる場合に優先度が大きくなるため、瞬時 SINR の大きさに拘わらず割り当て機会を公平に与えることができる。一方で、チャネル品質の劣るユーザにも割り当てが行われるため、MaxCIR 法に比べるとシステム容量が低下する。

以上に挙げた方式は、ラウンドロビン法を除いて、リソースの割り当て、伝送レート決定に物理層の指標である SINR を用いる方式である。以下では、トラフィックの QoS 要件である伝送遅延に着目した方式を一例解説する。

- UEPS (Urgency and Efficiency based Packet Scheduling) 法

UEPS 法では、RT (Real-Time) 型トラフィックの QoS 要件を満たしつつ、NRT (Non Real-Time) 型トラフィックのスループットを最大とすることを目的とする。UEPS 法では、パケットがユーザへ送信されるべき比重を表現するために、時間効用関数 (TUF: Time Utility Function) を用いる。RT 型、NRT 型のそれぞれの TUF 特性  $U_i(t)$  は、図 2.10 のように表される。横軸は、HOL (Head of Line) パケットが基地局の送信バッファに到着してからの時間、パケットを送信すべき緊急性は、 $U_i(t)$  の第一導関数の絶対値で表現される。また UEPS における割り当ての優先度は次のように表される。

$$P_{tki} = \frac{S_{tki}}{\overline{S_{tki}}} * |U'_i(t)| \quad (2.3)$$

右辺の  $\frac{S_{tki}}{\overline{S_{tki}}}$  の部分は PF 法と同様であり、それに緊急性を表す  $|U'_i(t)|$  を乗算した形となっている。図からわかるように、NRT 型トラフィックの TUF がほぼ単調減少の特性を示すのに対して、RT 型トラフィックは、パケットの送信期限の直前に TUF 値が急激に変化する。つまり、RT 型トラフィックのパケットは許容遅延にある程度近づくまで基地局のバッファに保持され、その間に NRT



型トラフィックの packets が送信される。一方で、許容遅延が差し迫った場合には、優先的に RT 型トラフィックの packets が送信される。このようにして UEPS 法では RT 型トラフィックの QoS 要件を満たしつつ、NRT 型トラフィックのスループットを最大とする。

このように従来方式では、あくまで物理層の指標である SINR を用いてリソースの割り当て、変調方式の決定を行う。最後の一例についても、上位層であるアプリケーション層の QoS を満たすべくスケジューリングを行うのであって、上位層の持つ伝送特性については加味されていない。

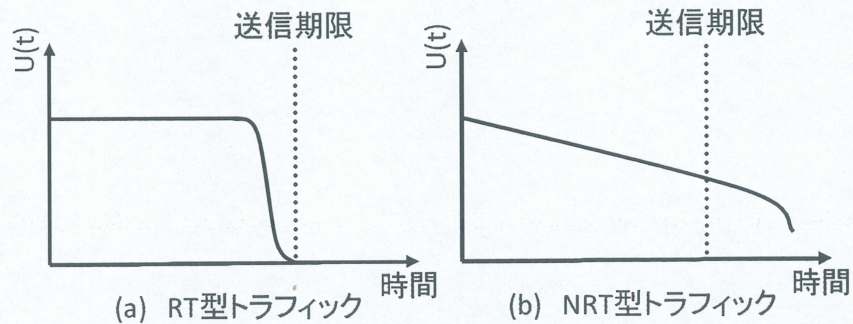


図 2.10 UEPS アルゴリズムにおける TUF 特性



## 第3章

# TCP(Transmission Control Protocol)

### 3.1 はじめに

本章では，本研究で想定する上位層プロトコルである TCP についての説明を行う．1973 年ごろ，スタンフォード大学において，従来のネットワーク制御プロトコル (NCP: Network Control Protocol) に代わるプロトコルとして初期の TCP が開発された．初期の TCP は，ネットワーク層とトランスポート層の両方の特徴をもち，現在の TCP/IP にも引き継がれている 32 ビットの IP アドレスや確認応答による再送機能，スライディング・ウィンドウによるフロー制御機構などが実装されていた．その後，3 ウェイ・ハンドシェークなどの機能の改善が進められ，TCP バージョン 4 が 1981 年にインターネットの技術仕様である RFC 793 として公開され，現在に至っている．



### 3.2 トランスポート層

図 3.1 に，OSI の参照モデルを示す．本論文の研究対象であるモバイル WiMAX では，物理層，データリンク層を規定している．一方，想定する上位層プロトコルである TCP はトランスポート層のプロトコルとして機能する．トランスポート層では，終点端末と始点端末間 (End-to-End) の通信の信頼性の提供と，アプリケーション間のセッションを開始するために必要となるポート番号の割り当てる役割を担う．通信の信頼性を提供するためにトランスポート層では，仮想回線の確立・維持・終了や通信障害の検出と復帰，通信相手側や経路におけるデータあふれが起こらないようにするための制御機構などを規定している．また，TCP の他にトランスポート層の代表的なプロトコルとして UDP が知られている．

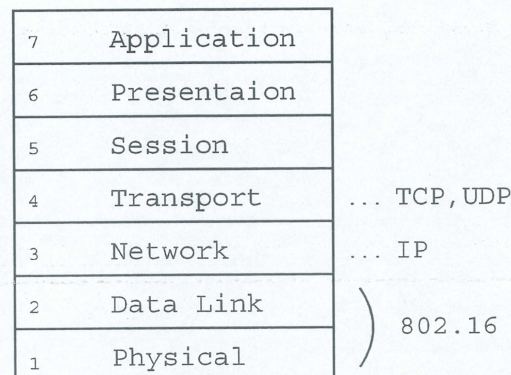


図 3.1 OSI 参照モデル



### 3.3 UDP

UDP(User Datagram Protocol) はトランスポート層のプロトコルであり，信頼性のないコネクションレスな配信サービスを提供する．つまり，メッセージの到着を確実にするための確認応答を用いず，受け取ったメッセージの順序も考慮せず，更に端末間の情報の伝送速度を制御するためのフィードバックの提供も行わない．よって，UDP メッセージは失われたり，重複したり，順番どおりに到着しない可能性がある．そのための対応が必要である場合にはアプリケーションにおいて行わなければならない．しかし，その分 TCP と比べデータ比率が高まるため，上位層においてメッセージの損失の影響が少ない音声やストリーム配信を用いる際に有効である．各 UDP メッセージは，ユーザデータグラムと呼ばれる．図 3.2 に示すように，UDP ヘッダは，データグラムの送信元ポート，あて先ポート，メッセージ長，UDP チェックサムを示す 4 つのフィールドからなる．送信元ポートフィールドは，UDP データグラムの送信元のアプリケーションを識別するための番号であり，通常は，あて先ポート番号さえあれば，相手のアプリケーションヘデータグラムを届けることができるが，応答を返す際にこの番号が必要となる．メッセージ長フィールドは，UDP データグラムの長さを表す．ヘッダの 8bytes とデータ部分の長さを加えた bytes 数がセットされる．チェックサムフィールドは，UDP データグラムの整合性を検査するための検査用データを表すフィールドであり，1 の補数演算を利用してチェックを行う．

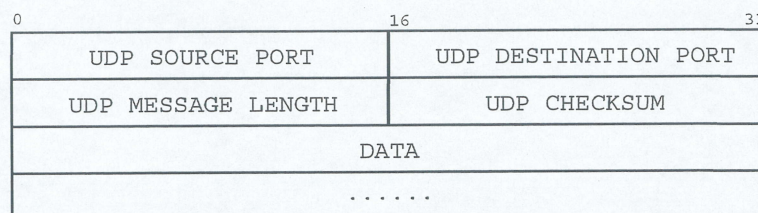


図 3.2 UDP データグラムのフォーマット



### 3.4 TCP

TCP はトランスポート層のプロトコルであり，信頼性の高い通信を提供する．信頼性の高い通信を保証するために，TCP ではデータを受け取った側では，必ず受信応答を返す．また，TCP を用いた通信は，双方向からの同時通信が可能な全二重通信であり，フロー制御のあるストリーム指向である．ストリーム指向では，二つのアプリケーションプログラムが大量のデータを転送する場合，データを8ビットオクテットに分割されているビットのストリームだと考える．そして，受信端末のトランスポート層において送信元と同様の順序のオクテット列を上位層に渡す．TCP ソフトウェア間の転送の単位は，セグメントと呼ばれる．図 3.3 に，TCP セグメントのフォーマットを示す．送信元ポートとあて先ポート，チェックサム領域は，UDP ヘッダにおけるそれと同様のものを示す．シーケンス番号フィールドは，現セグメントのバイトストリーム長における位置を示す．ACK 番号フィールドでは，TCP セグメントを正しく受け取ったことを通知するための番号を示す．HLEN フィールドは，32ビット単位で指定されるヘッダ長が入る．RESERVED は将来の為の予約で全て0が入る．RISERVED フィールドに続く6bits は Code bits と呼ばれ，セグメントの意味や処理方法について示す．WINDOW フィールドでは，受信側がどれだけの量のデータなら受け取れるかを示す．URG フラグが1の場合，緊急処理を要するデータの位置を示す．PADDING は TCP ヘッダが 32bits 単位に調整するために用意されている．

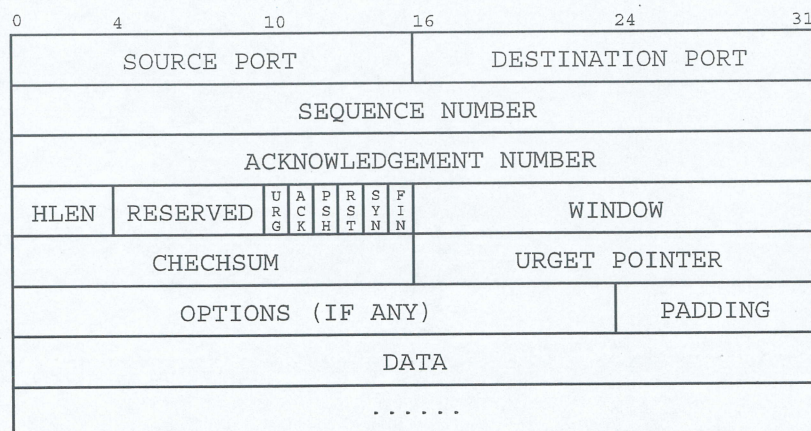


図 3.3 TCP セグメントのフォーマット



### 3.4.1 再送制御

TCP では、信頼性のあるストリーム配信サービスを提供するために再送機能を有している。TCP の再送機能では、データの受け取り手がデータを受信するたびに確認応答 (ACK: Acknowledgement) メッセージを規定している。ACK メッセージには、次に送信すべきセグメントのシーケンス番号が記載される。送信者は送信した各パケットの記録を保持し、確認応答を待つて次のパケットを送信する。また送信者はパケットを送るとき、タイマをスタートさせ、確認応答が到着する前にタイマが切れればパケットを再転送する。図 3.4 に、確認応答と再転送の様子を示す。図の左側が送信者、右側が受信者となっており、中央を横切る斜線がネットワークを介してのひとつのメッセージの転送を示す。

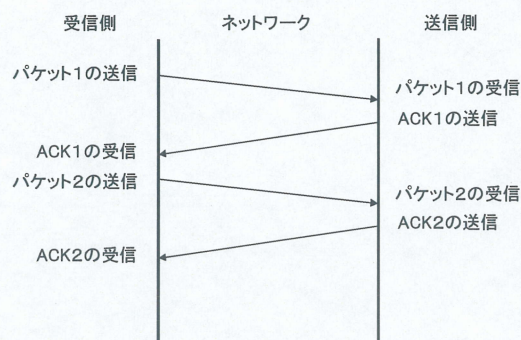


図 3.4 確認応答

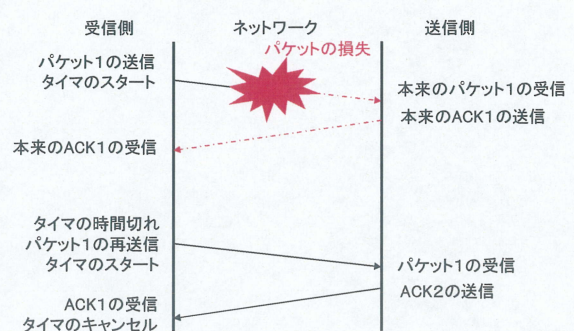


図 3.5 再送

### 3.4.2 フロー制御

送信側から受信側へデータを送る場合、受信側の処理が間に合わなくなることがある。この際、受信側端末では未処理データをバッファ(一時メモリ)に退避する。しかし、このバッファの容量にも限度があるため、バッファ容量をこえたデータは欠落し、結果として再送することになる。データがあて先までは正しく届いたのにも関わらず、バッファ溢れによる取りこぼしのために再送するのはネットワーク資源の浪費につながる。これを回避するため、受信側はその処理能力に合わせて、送信するデータ量を制御し、取りこぼしを防ぐ動作をする。これをフロー制



御と呼ぶ。

TCP におけるフロー制御では、受信側が送信側のデータ量をウィンドウ・サイズを使って制御する。ウィンドウ・サイズは、受信側が受信できるデータのバイト数である。従って受信処理側からサイズ0のウィンドウが通知されると送信処理が停止する。それにもかかわらずアプリケーションからの送信要求が続くと、送信バッファがいっぱいになり、送信要求をブロックすることとなる。

受信処理側から再度有限サイズのウィンドウが通知され送信処理が再開されると、送信要求のブロックを解除する。これは、図3.3に示したTCPヘッダのWINDOWフィールドに設定される。送信するデータがウィンドウ・サイズより大きい場合、受信側のバッファが空くまで待たなければならない。送信しようとするデータのサイズがウィンドウ・サイズより小さい場合、ACK番号を受け取ってなくても、ウィンドウに収まる間は、送信し続けられる。

ウィンドウを用いた送信量の制御のイメージを、図3.6に示す。受信側の端末はACKとともにWINDOWをセットする。図においてWINDOWで表示された枠は、この受信側からの要求でこのコネクションに適用されているウィンドウを示す。送信側は、このウィンドウ内のデータをACKが帰ってくる前に送信が可能である。このウィンドウ内の左端の送信済みデータが相手からACKされると、このウィンドウは右にシフトされる。

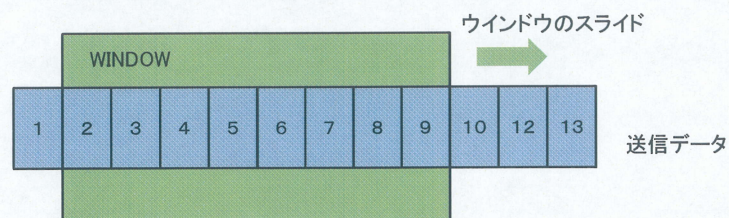


図 3.6 スライディングウィンドウ



### 3.4.3 輻輳制御

パケットネットワークでは、ルータのような中間端末においてパケットの処理が追いつかなくなった場合に輻輳が発生する。フロー制御の際の受信端末と同様に、ルータでは中継すべきパケットがすぐに処理できない場合、パケットをバッファに一時的に記録しておく。この際、ルータの処理能力を超えた量のパケットの受信が続くと、徐々にバッファ内のパケットが増加する。したがって各パケットの処理されるまでの時間、遅延が増加する。この遅延が、通信を行ううえで致命的なものとなった場合を輻輳という。

通常、エンドポイントでは輻輳が起こったことは知ることはできず、単に遅延として現れるだけである。また多くの通信プロトコルでは、前述の再送制御のように、伝送の完了が確認できない場合、自動で再送を行う機構を備えており、ネットワークに更なる負荷をかけ輻輳を悪化させてしまう。このような場合に輻輳への対策がなされていない場合、増加したトラフィックは遅延の増加をもたらし、再転送によりトラフィックの増加、という悪循環に陥り、ネットワークが使用不能になるまで続く。この状態を輻輳崩壊と呼ぶ。

したがって、輻輳崩壊を避けるために、輻輳が起こった際には転送速度を下げる必要があり、このような操作を輻輳制御という。

TCP では輻輳制御の実装の為に、輻輳ウインドウ (cwnd: congestion window) と呼ばれる制限を保持する。これは、フロー制御のウインドウと同様にパケットの流量を制限するものであるが、フロー制御のそれとは異なり、送信側でウインドウのサイズを決定する。受信側から通知されるウインドウ (rwnd) の大きさとあわせて、どの時点においても、TCP はウインドウの大きさが次のようになっているように振舞う。

$$\text{Allowed\_window} = \min(\text{rwnd}, \text{cwnd}) \quad (3.1)$$

輻輳のない状態においては、輻輳ウインドウは受信者のウインドウと同じ大きさとなる。輻輳ウインドウを減らすということは、TCP がコネクションに投入するトラフィックを減少させるということである。TCP では、パケット損失の大部分を輻輳によるものと仮定し、次のような輻輳ウインドウの減少操作等を行う。



- スロースタート (slow start)

送信開始時およびデータ再送信時において輻輳ウィンドウサイズを1に設定され,

$$cwnd(0) = 1 \quad (3.2)$$

受信確認応答を受け取るたびに, 輻輳ウィンドウサイズは1ずつ増加される.

$$cwnd(k+1) = cwnd(k) + 1 \quad (3.3)$$

したがって  $cwnd$  は指数関数的に増加する. また,  $cwnd$  がある閾値 ( $ssthresh$ : slow start threshold) を超えると,  $cwnd$  の増加は次のようになり, 輻輳を検知するようになり輻輳回避状態に移行する.

$$cwnd(k+1) = cwnd(k) + \frac{1}{cwnd(k)} \quad (3.4)$$

- 輻輳回避状態

タイムアウトによるセグメントが損失を検知した場合, ウィンドウサイズを1にリセットし, 再びスロースタートを開始する.

- ファストリトランスミット (fast retransmit)

TCP ではウィンドウサイズ数のセグメントを一度に送信するため, 送信側では複数の ACK を一度に受け取る. 正確に伝送が行われた場合, それぞれの ACK には異なるシーケンス番号が示される. したがって, 同じシーケンス番号の ACK セグメントを3回受け取った場合, セグメント損失が発生したと判断し, 再送タイムアウトを待たずにセグメントの再送を行う.

- ファストリカバリー (fast recovery)

ファストリトランスミットによりセグメント損失を検知した場合, 輻輳ウィンドウの半分の値を  $ssthresh$  として記録する. またウィンドウサイズを  $ssthresh$  にセットし,  $cwnd$  を次のように増加させる.

$$cwnd(k+1) = cwnd(k) + \frac{1}{cwnd(k)} \quad (3.5)$$



### 3.5 セグメント喪失に対する TCP の特性

先に述べたように、TCP では輻輳崩壊を避けるべくセグメントの喪失が発生した場合、輻輳ウインドウサイズを小さくする制御を行う。つまり伝送レートを低下させる。確かに、セグメントの喪失の主な原因が、輻輳によるルータ等におけるバッファ溢れとなる有線ネットワークにおいて有効な制御である。しかしながら、無線通信においてセグメントの喪失は、輻輳によるものよりも伝送誤りにより生じるものが支配的である。つまり、伝送誤りが頻繁に起こる無線ネットワーク上では、余剰な輻輳制御により TCP のスループット特性が著しく低下する。図 3.7 に、計算機シミュレーションにより WiMAX 上で TCP を動作させた場合のスループットを示す。横軸はパケット誤り率を示し、縦軸は PER が 0 の時の値で正規化したスループットとなっている。図からわかるように、輻輳制御を用いないプロトコルにおいて、スループットが PER に比例して低下するのに対して、TCP では PER が 0.001 付近と小さい値から急激に低下している。このように TCP を無線通信において用いると、伝送効率が低下する可能性を孕んでいる。また、WiMAX のような規格では、利用用途としてインターネットが考えられており、多くのインターネットアプリケーションではトランスポート層において TCP を用いる。しかし、多くのコネクションにおいて TCP を用いるにもかかわらず、従来のリソース割り当て法では、TCP の輻輳制御によるパフォーマンスの低下は考慮されていない。従って、TCP を用いる無線通信において伝送効率を高めるためには、下位層において過剰な輻輳制御を抑制するべく、リソース割り当てにおいて、適切な変調方式の選択を行う必要がある。



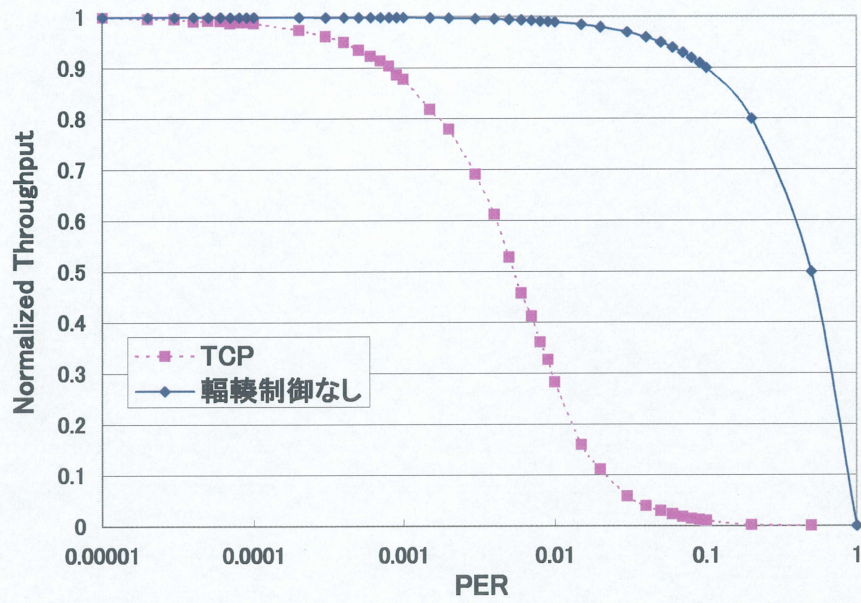


図 3.7 PER に対する TCP スループット特性



## 第4章

# TCP の特性を考慮した OFDMA リソース割り当て法

### 4.1 はじめに

本章では，上位層プロトコルとして TCP を用いた場合の，モバイル WiMAX における上位層プロトコル特性を考慮した OFDMA リソース割り当て法を提案する．提案方式を用いることにより，上位層プロトコルが TCP の場合に，輻輳制御による伝送効率の低下を抑制することが可能となる．そのためスループット特性が改善することを明らかにする．

OFDMA では各フレームにおいて，各サブチャネルを柔軟に各ユーザに割り当てることが可能である．また WiMAX では複数の変調方式，複数の符号化率に対応しており，各ユーザの受信環境に適した，サブチャネル，変調・符号化方式を選択することにより効率的な伝送を行う事が可能である．これまでも受信環境の目安である SNR や，トラフィックの QoS を考慮した様々なリソース割り当て法が提案されている．しかし，WiMAX などのサービスを想定した場合，利用用途としてインターネット接続が予想され，トランスポート層では TCP が利用されることとなる．この TCP はセグメント損失に基づいて輻輳制御を行う事から，伝送誤り率と伝送速度に非線形な特性を持つ複雑なプロトコルである．ところが，前述のように従来方式では上位層の持つ通信特性を考慮していない．そこで本研究では，OFDMA における無線リソースの割り当ての際に TCP の特性を考慮することで，TCP スループットの改善と効率的なリソースの使用が可能になると考える．



## 4.2 TCP の特性を考慮した OFDMA リソース割り当て法

本章では、図 4.1 に示すような OFDMA システムにおける、下りリンクのリソース割り当て方式を想定する。各ユーザは、基地局との距離が異なることから平均 SNR が異なる。また、同ユーザ内であってもフェージングの影響により、サブキャリア毎に異なる値を示す。上りリンクにおいて、各ユーザはサブチャネル単位のチャネル品質情報を基地局にフィードバックする。提案方式では、基地局にフィードバックされた情報を基に、達成されると予想される TCP スループットの測定を行い、無線リソースの割り当てを行う。そして、基地局はその割り当てに従って下りリンクにおいて、各ユーザ宛にパケットを送信する。提案方式の手順は、“優先度の決定”と“リソースの割り当て”の 2 つに大きく分けられる。続けて、それぞれの手順について説明を行う。

なお提案方式は、IEEE802.16e 規格上での動作を想定しており、特別な規格の変更及び拡張を必要としない。そのため提案方式を実システムに適用する場合、ハードウェアの仕様変更を必要とせず、ソフトウェアの書き換えのみで実現可能である。また提案法では、パケット誤り率に対する TCP を考慮するため従来法と比較し、リソース割り当ての際の計算量が大きくなる。しかしながら提案法では、予め求めておいたパケット誤り率に対応する TCP スループットテーブルの参照のみを行うため、計算量の増加はわずかなものと考えられる。

### 4.2.1 優先度の決定式

提案方式では、TCP のスループット特性を考慮するため、優先度決定のパラメータとして推定 TCP スループットを用いる。基地局では、フィードバックされたチャネル情報を基に以下の式に従い、ユーザ  $i$ 、サブチャネル  $k$  のリソース割り当て優先度  $P_{ki}$  を計算する。

$$P_{ki} = \underset{(0 \leq m \leq 6)}{\text{Max}} [T_{ki}^m * b_m] \quad (4.1)$$

ここで  $m$  は変調方式のインデックスであり、 $b_m$  が変調方式  $m$  を用いた際のシンボル当たりのビット数である。また  $T_{ki}^m$  は正規化された推定 TCP スループットであり、フィードバックされた推定 SNR より求める推定パケット誤り率から算出する。この優先度  $P_{ki}$  をフレームごとに、各ユーザの全サブチャネルについて計算



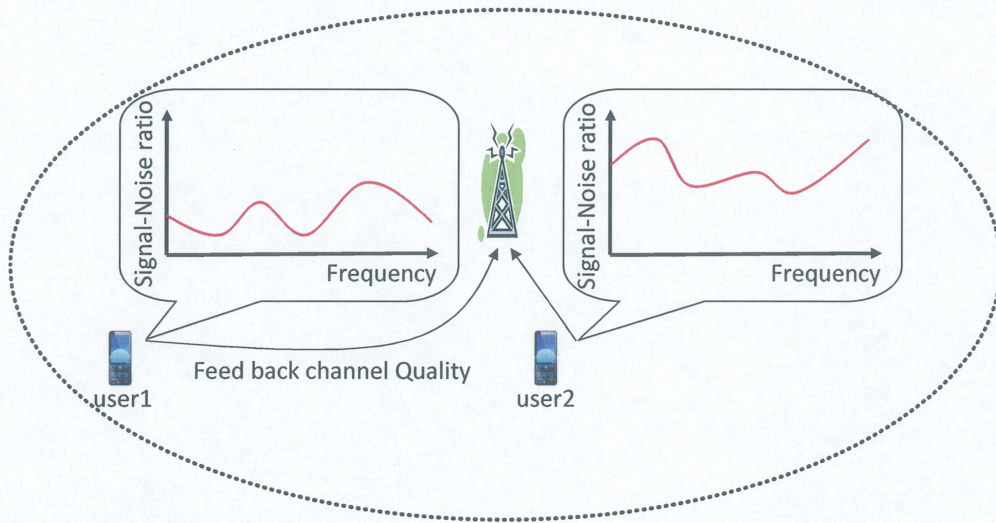


図 4.1 想定システム

を行う。なお、推定 TCP スループットを求めるためには、シミュレーション又は理論解析モデル [26] などから、パケット誤り率に対する TCP スループット特性を事前に求めておくものとする。

#### 4.2.2 リソース割り当て方式

提案方式では、以下の手順に従い無線リソースの割り当てを行う。

1. 各サブチャネルにおいて、現在のフレームでの割り当てサブチャネル数が最小かつ  $P_{ki}$  が最大となるユーザにサブチャネルの仮割り当てを行う。
2. 全サブチャネルの仮割り当て後に、仮割り当てを行ったユーザ間で仮割り当てサブチャネルを交換した場合のシステムスループット特性の確認を行う。またその際に、交換によりスループット特性の改善が見込まれる場合には仮割り当てサブチャネルを交換する。

図 4.2 にあるフレームにおける 3 サブチャネル、3 ユーザの場合の提案方式における無線リソース割り当て例を示す。図 4.2(a) は仮割り当て後の様子を表している。次に、サブチャネルが仮割り当てが行われたユーザ間において、サブチャネ

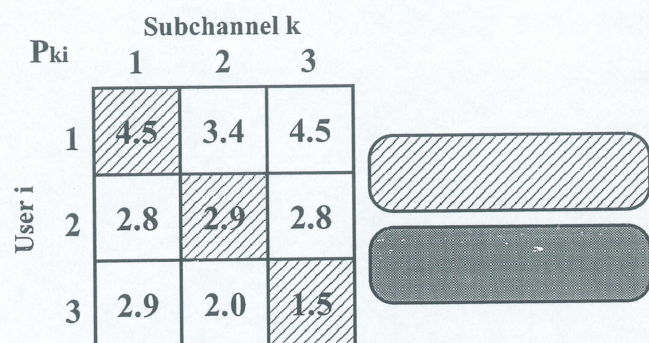


ルを交換した場合の  $P$  の合計値を算出し、交換前の値との比較を行う。図 4.2(b) では、ユーザ 1 とユーザ 2 の間において、サブチャネル交換前後の  $P$  の合計値の比較を行っている。この場合は、サブチャネル交換前が  $P_{1,1} + P_{2,2} = 7.4$ 、交換後が  $P_{1,2} + P_{2,1} = 6.2$  となり、交換前の割り当ての方がシステムスループットが大きくなると考えられるので、割り当てサブチャネルの調整は行わない。

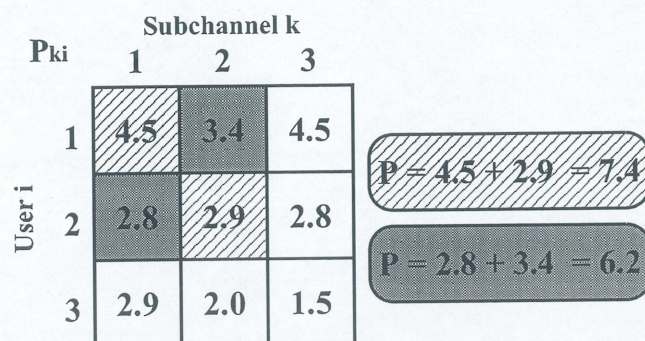
次に、図 4.2(c) に示すように、ユーザ 1 とユーザ 3 の間においてサブチャネル交換前後の  $P$  の合計値の比較を行う。こちらの場合は、交換前が  $P_{1,1} + P_{3,3} = 6.0$ 、交換後が  $P_{1,3} + P_{3,1} = 6.4$  となり、割り当てサブチャネルの交換を行った方がシステムスループットの改善が見込めると判断でき、交換を実施する。

この後、ユーザ 2 とユーザ 3 の間でも同様の比較を行い、割り当てサブチャネルの交換を行うか判断する。このように、システムとしての伝送容量を改善する割り当ての組み合わせを考えることにより、より効率的な無線リソースの利用を可能とする。またサブチャネル数が 3 チャネル以上の場合も、同様の手順を繰り返す事により割り当てを行う。この結果を用いて、最終的な割り当てサブチャネルの決定を行う。

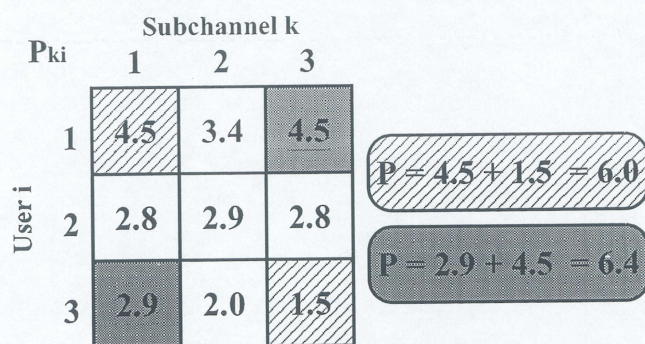




(a)Step1



(b)Step2



(c)Step3

図 4.2 リソース割り当ての例



## 4.3 数値例

### 4.3.1 シミュレーション諸元

提案方式の有効性を確認するために、ネットワークシミュレータ Qualnet を利用した計算機シミュレーションを行った。また、比較対象の従来方式として、優先度の判定にビット誤り率を用いた方式を検討した。従来方式では、所要ビット誤り率を満たす最も高速な変調方式のシンボルあたりのビット数を優先度とし、割り当て手順については提案方式と同様のものとする。なお所要 BER は 0.001 とし、表 4.1 に各変調方式の所要 SNR を示す。

シミュレーションでは、シミュレーションエリア中心部に基地局となるユーザが存在し、シミュレーションエリア内に固定数のユーザを基地局から 750m の距離までに等間隔に配置を行う状況を検討した。各ユーザは基地局と直接通信を行うものとし、他ユーザによる中継動作などは行われず。伝搬モデルについては、都市部における見通し外通信を想定しており、伝搬損失は 3.5 乗の距離減衰とする。また、フェージング環境はレイリーフェージングを想定し、遅延パスモデルについては、仕様策定団体である WiMAX フォーラムで定めた評価モデル [27] を用いた。表 4.2 に遅延パスモデルを示す。また、無線通信システムは、モバイル WiMAX (OFDMA) を想定し、使用周波数帯域は 2.5GHz、使用帯域幅は 20MHz とした。想定システムでは、変調方式として QPSK, 16QAM, 64QAM をサポートし、符号化率についても複数のレートを扱う。サブチャネル構成は、ユーザダイバーシティ効果の大きい隣接サブキャリア配置法である band AMC を用いた。なお簡単のために、リソースの割り当て単位は隣接する 20 サブチャネルを 1 つの割り当て単位とした。これは最低伝送レートの変調方式 QPSK(1/2) であっても、各割り当てリソース内で最大サイズの packets が送信できるようにするためである。更に、ユーザから基地局にフィードバックされるチャネル品質情報については、伝送誤りはないものとする。また、トラフィックモデルは、トランスポート層において TCP を使用するアプリケーションである FTP を用い、基地局には常に、全ユーザ宛てのトラフィックが存在するものとする。表 4.3 にシミュレーション諸元を示す。



表 4.1 各変調方式における所要 BER を満たす SNR 値

Modulation (coding rate)	SNR [dB]
QPSK (1/2)	6.3
QPSK (2/3)	7.4
16QAM (1/2)	11.7
16QAM (2/3)	15.1
64QAM (1/2)	17.2
64QAM (2/3)	19.0
64QAM (3/4)	19.6

表 4.2 遅延パスモデル

Power of the path [dB]	Path Delay [ns]
0	0
-9.7	110
-19.2	190
-22.8	410



表 4.3 シミュレーション諸元

Simulator	QualNet4.5.1
Simulation time	100 [s]
Number of users	3,4,5,6,7,8
System	mobile WiMAX (OFDMA)
Propagation channel frequency	2.5 [GHz]
Channel bandwidth	20 [MHz]
Subcarrier allocation for subchannel	band AMC
Number of subchannels	60
Frame duration	5 [ms]
Modulation (coding rate)	QPSK (1/2,2/3), 16QAM (1/2,2/3), 64QAM (1/2,2/3,3/4)
Application	FTP
Transport	TCP
Maximam Segment Size	512 [byte]
Target BER	0.001
Propagation pathloss model	proportional to the 3.5 power of the distance
Wireless environment	Rayleigh fading
Doppler frequency	6.944 [Hz]



## 4.3.2 TCP ファストリトランスミット率

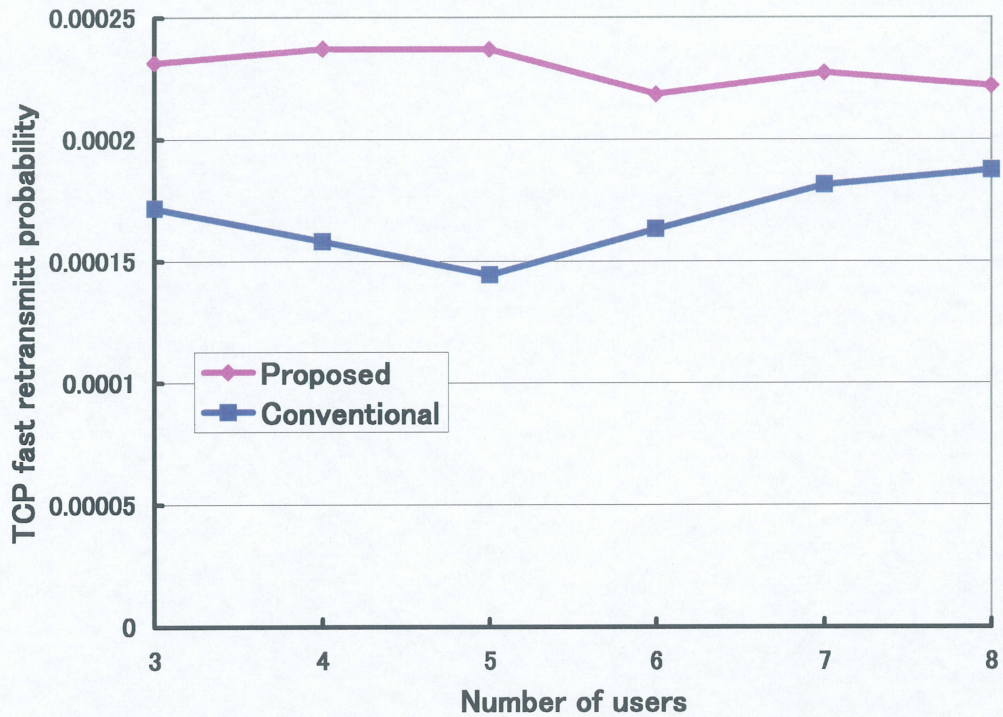


図 4.3 TCP ファストリトランスミット率

図 4.3 に TCP ファストリトランスミット率を示す。TCP ファストリトランスミット率は、基地局からの総送信セグメント数に対するファストリトランスミットにより送信したセグメントの割合を表す。結果より、従来方式と比較して提案方式のファストリトランスミット率が高くなっているのがわかる。これは提案方式では TCP のウィンドウサイズを大きく維持することから、あるセグメントにおいて伝送誤りが起こった場合でも、正確に伝送された他のセグメントの確認応答より、迅速に伝送誤りを検知できるためである。またファストリトランスミットでは、ウィンドウサイズを現時点の  $1/2$  とするために、タイムアウトが発生した場合の輻輳制御よりもパフォーマンスの低下を小さく抑えることができる。



## 4.3.3 TCP タイムアウト率

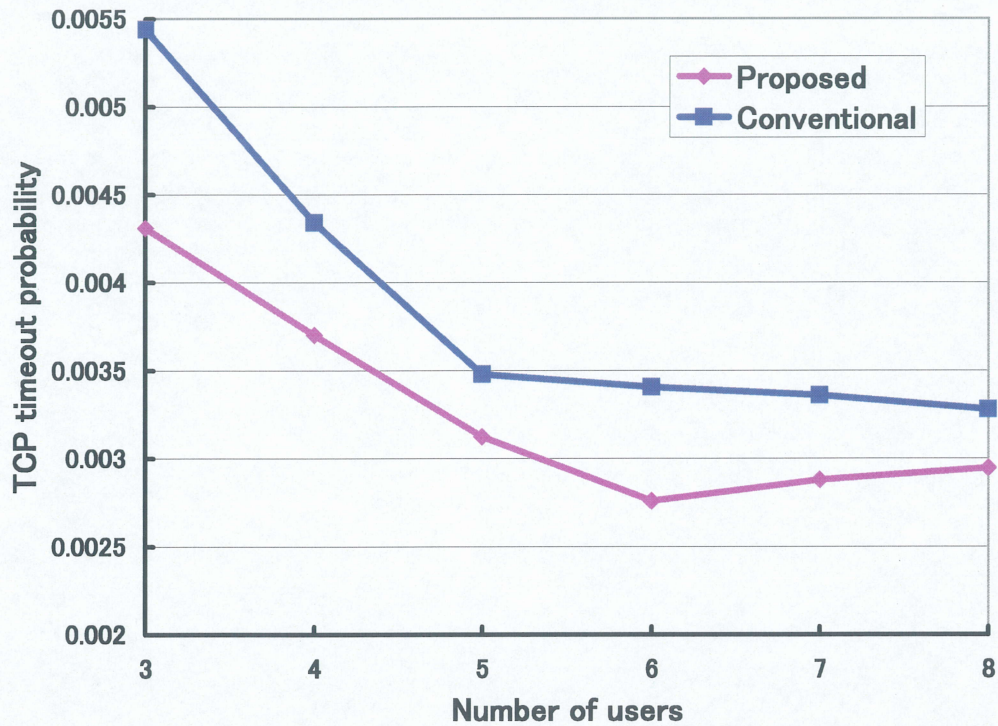


図 4.4 TCP タイムアウト率

図 4.4 に TCP タイムアウト率を示す。TCP タイムアウト率は、基地局からの総送信セグメント数に対するタイムアウトとなったセグメントの割合を表す。結果より、提案方式のタイムアウト率は従来方式と比較して 0.05-0.1%程度低く抑えられている。TCP ではタイムアウトが発生した場合、一時的にセグメントの送信を停止する。したがって先に示した TCP ファストリトランスミット率の結果と併せて、提案方式では TCP の輻輳制御によるパフォーマンスの低下を抑制できたといえる。



#### 4.3.4 ユーザスループット

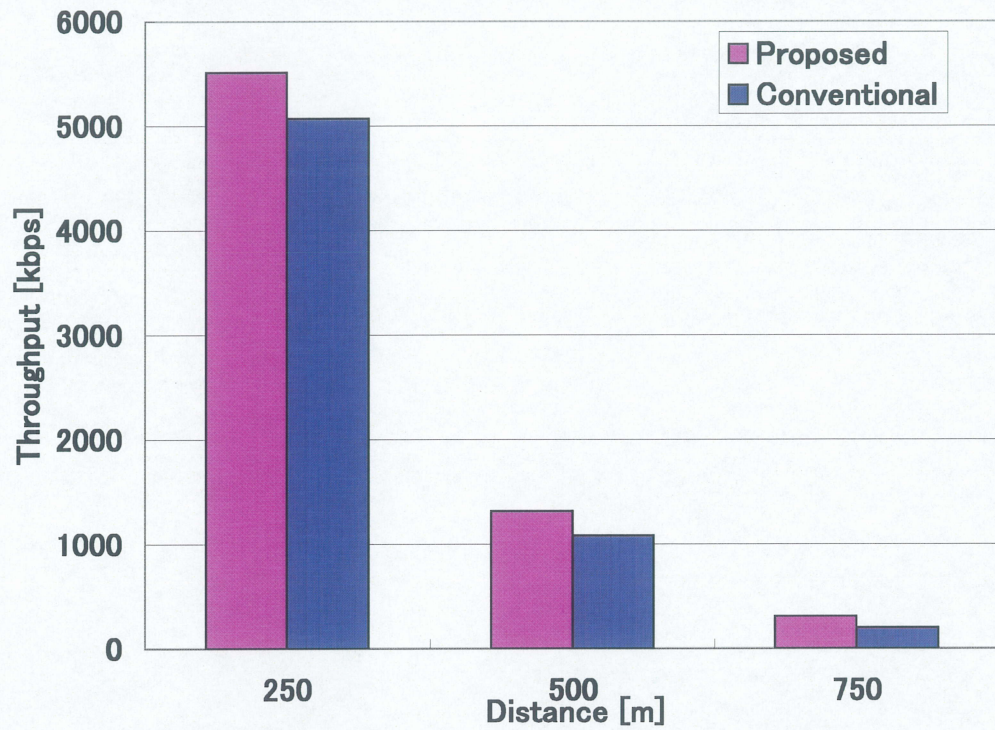


図 4.5 3 ユーザ時のユーザスループット

図 4.5 に 3 ユーザの場合のユーザスループットを示す。結果より、どの地点のユーザにおいても提案方式がよりよい特性を示している。また、より基地局に近いユーザにおいて改善量が大きくなっている。



## 4.3.5 システムスループット

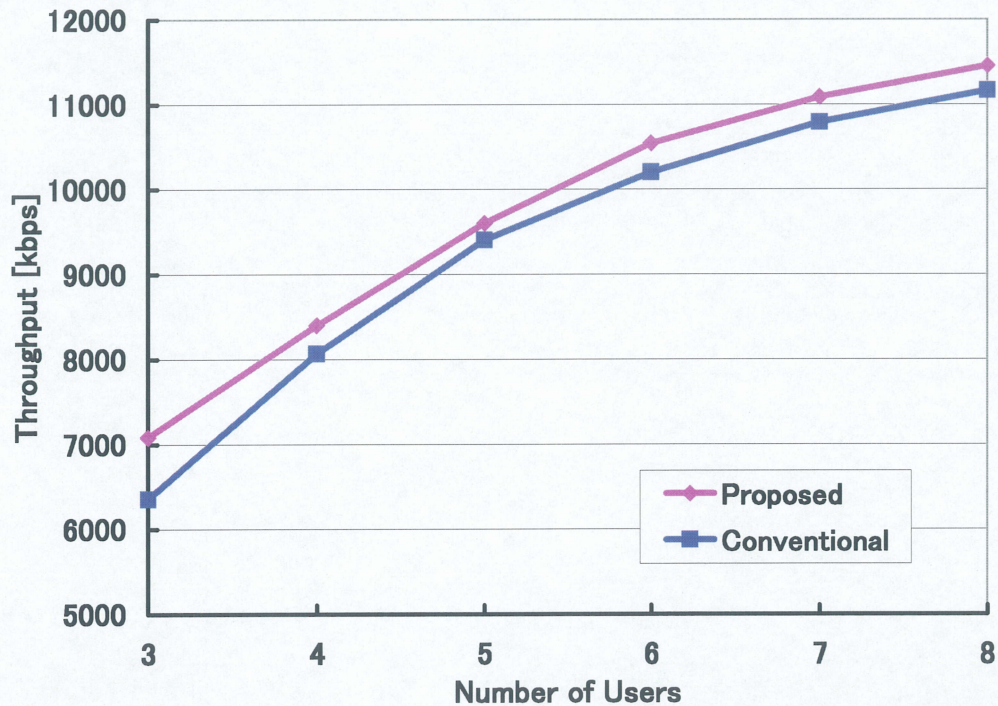


図 4.6 システムスループット

図 4.6 にダウンリンクにおけるシステムスループットを示す。結果より、両方式ともユーザ数が増加するにしたがって、システムスループットも増加している。これはユーザ数の増加により、ユーザダイバーシティ効果が高まり、より高伝送レートが可能なユーザにリソースが割り当てられるようになるためである。

また、提案方式では各ユーザ数において数百 kbps の改善が見られる。これは、提案方式における変調方式の選択において、TCP の通信特性を考慮をすることにより、特性の劣化が見込まれる場合には低い伝送レートを選択し、余剰な輻輳制御を抑制できたためと考えられる。



## 第5章

### 結論

#### 5.1 本研究のまとめ

本研究では、近年多くの通信方式で用いられる OFDMA における、効率的なリソース割り当ての方法についての検討を行った。従来法では多くの場合、下位レイヤの指標である SNR や BER 等を用いて割り当てを行っていた。しかしながら、上位層プロトコルの中には TCP のようにセグメント損失に対し非線形な伝送特性を持つなど、特徴的な特性を示すプロトコルが存在する。そこで、本研究では OFDMA におけるリソース割り当てにおいて、上位レイヤプロトコルである TCP の特性を考慮した方式を提案した。提案方式では、あらかじめ計算を行っておいた推定 TCP スループットを用いて、適切な伝送レートを選択し、システムスループットが改善可能であることを示した。

#### 5.2 今後の課題

本研究では、特定のシチュエーションにおける提案法の有効性のみを示した。しかしながら実際のモバイル WiMAX システムを想定した場合、各ユーザはランダムに位置し、移動も考慮しなくてはならない。またマルチセルにおける、同一チャネル間の干渉の考慮も必要である。そのような環境下において提案方式が有効である場面と、有効性が発揮できない場면을切り分ける必要がある。

また今回の検討では、上位レイヤプロトコルに TCP を想定し、新たなリソース



割り当て法の検討を行った。しかし、ネットワーク上では種々のプロトコル、アプリケーションが用いられる。したがって、それぞれの通信特性についても考慮する必要がある、更にそれらが混在する環境下についても検討が必要である。



## 参考文献

- [1] 総務省, “平成 21 年版 情報通信白書”, 2009.
- [2] B.P. Crow, I. Widjaja, J.G. Kim, and P.T. Sakai, “IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks”, IEEE Commun. Mag., pp.116–126, Sep. 1997.
- [3] IEEE Std 802.11a 1999, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer extension in the 5 GHz Band”, Technical report, Sep. 1999.
- [4] IEEE Std 802.11g 2003, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer extension in the 2.4 GHz Band,” Technical report, June 2003.
- [5] IEEE Std 802.11n 2009, “Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Enhancement for Higher Throughput-2009 Amendemet 5”, Technical report, Sep. 2009.
- [6] 3GPP, TS25-308, “High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description; Stage2”, Mar. 2003.
- [7] IEEE Std 802.16-2004, “Part 16:Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”, 2004.
- [8] IEEE Std 802.16e-2005, “Part 16:Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems”, 2005.
- [9] 王芳, 山本正明, 内藤克浩, 森香津夫, 小林英雄, “OFDM 通信方式における残留



- 周波数オフセット補償方式の提案”, 映像情報メディア学会誌, 映像情報メディア 60(5), pp.773-780, May 2006.
- [10] 杉本大樹, 佐藤拓朗, 富永英義, “OFDM システムにおけるパイロット信号を用いたサンプリング周波数オフセット及び残留キャリア周波数オフセット補償方式”, 電子情報通信学会論文誌. B, J92-B(9), pp.1513-1525, Sep. 2009.
- [11] 小林英雄, 森香津夫, “バーストモード OFDM 信号のガードインターバル設計手法の提案”, 電子情報通信学会論文誌. B, J87-B(2), pp.773-780, Feb. 2004.
- [12] 森脇和也, 内藤克浩, 森香津夫, 小林英雄, “ガードインターバルを超える遅延波が存在する移動通信環境下における OFDM 復調方式に関する検討,” 電子情報通信学会論文誌. B, J91-B(9), pp.1125-1130, Sep. 2008.
- [13] J. Armstrong, “Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering,” *Electron. lett.*, pp.246-247, Feb. 2002.
- [14] T. Fujii, M. Nakagawa, “Adaptive Clipping Level Control for OFDM Peak Power Reduction Using Clipping and Filtering”, *IEICE Trans. fundamentals of electronics, communications and computer sciences.* pp.1647-1655, July 2002.
- [15] R. W. Bauml, R. F. H. Fischer, J. B. Huber, “Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping”, *Electron. lett.*, pp.2056-2057, Oct. 1996.
- [16] S. H. Muller, J. B. Huber, “OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequence”, *Electron. lett.*, pp.368-369, Feb. 1997.
- [17] Z. Shen, J. G. Andrews, B. L. Evans, “Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems With Proportional Rate Constraints”, *IEEE Trans.*, vol.7, no.1, Jan. 2008.
- [18] M. Einhaus, O. Klein, “Performance Evaluation of a Basic OFDMA Scheduling Algorithm for Packet Data Transmissions”, *Proc. 11th IEEE Symposium on Computers and Communications(ISCC'06)*, pp.695-702, June 2006.



- [19] R. Nararat, J. Yusheng, "Performance Improvement of Proportional Fairness-Based Resource Allocation in OFDMA Downlink Systems", IEICE Trans. Commun., E92-A(9), pp.2191-2199, 2009.
- [20] C. Wengerter, J. Ohlhorst, A. E. von Elbwart, "Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA", Proc. IEEE 61st Vehicular Technology Conference, vol.3, pp.1903-1907, June 2005.
- [21] 清水佑輔, 笹瀬巖, "OFDMA においてトラヒックの QoS 要求を満足しスループットを増加するパケットスケジューリング及びサブチャネル割り当て", 電子情報通信学会技術研究報告, RCS, 無線通信システム, pp.47-52, Jan. 2009.
- [22] S. Ryu, B. Ryu, H. Seo, and M. Shin, "Urgency and efficiency based packet scheduling algorithm for OFDMA wireless systems", International Conference on Communications(ICC2005), vol.4, pp.2779-2785, May 2005.
- [23] H. Balakrishnan, V.N.P.S. Seshan, and R.H. Katz, "A Comparison of Mechanisms for Improving TCP Performance over Wireless Links," IEEE/ACM Trans. Networking, vol.5, no.6, pp.756-769, Dec. 1997.
- [24] G. Xylomenos, G. C. Polyzos, "TCP and UDP Performance over a Wireless LAN", Proc. IEEE INFOCOM'99, vol.2, pp.439-446, Mar. 1999.
- [25] A. Fieger, M. Zitterbart, "Transport Protocols over WirelessLinks", Proc. 2nd IEEE Symposium on Computer and Communications(ISCC'97), pp.456, July 1997.
- [26] M. Zorzi, A. Chockalingam, and R.R. Rao, "Throughput analysis of TCP on channels with memory", IEICE Trans. Fundamentals, vol.18, pp.1289-1300, July 2000.
- [27] WiMAX forum, "WiMAX System Evaluation Methodology version 2.1", July 2008.



## 謝 辞

本研究を進めるにあたり多大なる御指導と御助言を頂いた三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の小林英雄教授, 森香津夫准教授, 内藤克浩助教に深く感謝致します。そして, 論文の査読をしていただいた三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻の篠木剛教授に深く感謝致します。最後に, 研究室の設備等で研究環境を整えてくださった山本好弘技術職員, ならびに通信工学研究室の諸氏に心より感謝致します。

2010 年 2 月 3 日