

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：32678

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13993

研究課題名(和文) 5G移動通信方式のための適応デュプレクス技術の研究

研究課題名(英文) Study on Adaptive Duplex Techniques for 5G Mobile Communication Systems

研究代表者

佐和橋 衛 (Sawahashi, Mamoru)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：50449287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、Half Duplex (HD)-Frequency Division Duplex (FDD)におけるフィードバック制御情報のオーバーヘッドを低減することを目的として、キャリア周波数スワップを用いる送受信機構成の検討を行い、フィードバック制御情報の低減効果を示した。また、セルラシステムにフルデュプレクス(FD: Full Duplex)を適用したときの周波数利用効率改善するシンボル繰り返しを用いる物理チャネル多重法、及びデジタル自己干渉キャンセラ(DSIC: Digital Self-Interference Canceller)構成法を提案し、自己干渉の抑圧効果を示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed a transceiver structure using carrier frequency swapping for reducing feedback control signal overhead and showed the effect of decreasing the signal overhead for half duplex (HD)-frequency division duplex (FDD). We also proposed a physical channel multiplexing method employing symbol repetition and a structure of alternately iterative digital self-interference canceller (DSIC) aiming at improving cell throughput or frequency efficiency when applying full duplex (FD) to cellular systems with a multi-cell structure. We showed the effects of suppressing self-interference that is the most significant impairment for applying FD to cellular systems.

研究分野：移動通信

キーワード：移動体通信 キャンセラ フルデュプレクス 自己干渉 デジタル自己干渉キャンセラ 非対称トラヒック分布 周辺セル干渉 キャリア周波数スワップ 干渉

## 1. 研究開始当初の背景

Long Term Evolution (LTE)の加入者数が急増するとともに、セルラネットワークにおけるトラフィック量が急増している。従って、LTE-Advanced に比較して、2020 年には 100 倍以上のトラフィックを収容できる移動通信ネットワークの無線アクセス方式を構築する必要がある。3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP)において、第 5 世代(5G)移動通信方式の無線インタフェースの標準化が開始されている。5G 方式では従来方式の主なサービスであるモバイルブロードバンド (Mobile Broadband) サービスの一層の超高速・大容量化に加えて、膨大な数の機械型通信用(MTC: Machine Type Communications)、超高信頼低遅延(URLLC: Ultra Reliable Low Latency Communications)サービスの提供を目標としている。LTE-Advanced に比較して、100 倍以上のシステム容量を実現するために、マクロセルがオーバレイされたエリアの中のトラフィックが集中した場所に小セルを設置するヘテロロジーニアスネットワーク、基地局 (BS: Base Station)に多数のアンテナを実装する massive Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)などの適用が検討されている。

## 2. 研究の目的

第 4 世代(4G)移動通信方式までは、周波数分割デュプレクス(FDD: Frequency Division Duplex)が用いられてきた。これは時間分割デュプレクス(TDD: Time Division Duplex)をマルチセル構成のセルラシステムに適用した場合、セルサイト(基地局)間の高精度なタイミング同期が必須であり、ネットワーク及びユーザ端末に対する機能の負荷が大きいためである。一方、TDD は、ペアバンドが不要であり上り及び下りリンクのトラフィック分布に応じた柔軟なリソース割り当てが実現でき、また、無線伝搬路の Channel reciprocity が利用できるため、フィードバック制御情報のオーバーヘッドを削減できるメリットがある。従って、3.4 GHz 帯の 4G 用の周波数スペクトルでは、TDD も適用されている。5G 方式まで採用されている FDD 及び TDD は、上り及び下りリンクで異なる周波数スペクトルあるいは時間スロットを用いるため、ハーフデュプレクス(HD: Half Duplex)と呼ばれている。HD-FDD あるいは HD-TDD を用いる上り及び下りリンクの固定的な周波数スペクトルの割り当ては、将来の 5G 方式における周波数利用効率の一層の増大に対して、以下に示す課題がある。

A. 制御情報及び参照信号のオーバーヘッドの増大：4G 方式においては、信号空間の変調多値数の増大、及び MIMO チャンネルを用いる空間多重(SDM: Spatial Division Multiplexing)の送受信アンテナ数の増大が周波数利用効率の向上に大きく貢献している。LTE では最大 4 アンテナ、LTE-Advanced では最大 8 アンテナを用いる MIMO SDM により、それぞれ 100 Mbps 及び 1 Gbps 以上のピークデータ

レートを実現できている。5G 方式においても、特に小セルでは MIMO SDM は必須技術であり、適用される送受信アンテナ数は増大すると想定される。FDD においてさらに送受信アンテナ数が増大すると、適応レート制御のための適応変調・チャンネル符号化(AMC: Adaptive Modulation and Coding)などにおける受信チャンネル品質(CQI: Channel Quality Indicator)、指向性ビーム送信を行う MIMO SDM に必要な送信ストリーム数を示すチャンネルのランク情報(RI: Rank Indicator)、及びプリコーディング行列情報(PMI: Precoding Matrix Indicator)のフィードバック制御情報、及び受信品質測定用の参照信号(RS: Reference Signal)のオーバーヘッドが非常に増大する。従って、フィードバック制御情報及び RS のオーバーヘッドの制約から、MIMO SDM で実現できるスループット、周波数利用効率が制限されてしまう。

B. HD の適用による周波数利用効率の低減：基地局及びユーザ端末において受信部に回り込む送信信号の自己干渉 (SI: Self-interference) を充分低いレベルに減衰させるために HD が採用されており、周波数利用効率の劣化を招いている。この課題に対して、近年、上り及び下りリンクで、同一の周波数帯域、同一の時間スロットを用いるフルデュプレクス(FD: Full Duplex)の適用が提案されている(全二重通信とも呼ばれる)。FD は、HD-FDD あるいは HD-TDD に比較して柔軟なリソースの割り当てが可能で、周波数利用効率を改善できる。しかしながら、FD をセルラシステムに適用した場合に次の劣化要因がある：送信部から受信部に回り込む自己干渉(SI)、上り及び下りリンクのトラフィック分布の非対称性、周辺セルからの同一チャンネル干渉。

本研究課題では、5G 移動通信方式への適用を目指して、トラフィック需要やユーザの干渉状態に応じた実質的な周波数スペクトルの利用効率を一層向上させることを目的として、周波数スペクトルを高効率に用いる適応デュプレクス方式を実現する送受信機構成、及び無線リソースの割り当て法を確立する。具体的には、次の技術検討を行う。

### (1) 制御情報のオーバーヘッドの低減

前述のように、HD-TDD はフィードバック情報のオーバーヘッドを低減できる等のメリットがあるものの、割り当て時間スロット位置に応じて、制御遅延が増大してしまう。従来、主に用いられてきた HD-FDD でフィードバック情報のオーバーヘッドを低減できるリソース割り当て法を検討する。

### (2) 周波数利用効率の向上

システム容量を増大することができ、低伝送遅延を実現できるメリットを有する FD における、前述の性能を制約する要因を解決し、セルラシステムにおける FD を用いた場合のセル当たりのスループット(周波数利用効率)増大技術を確立する。

### 3. 研究の方法

FD を適用した場合の自己干渉を低減するアンテナアイソレーション, 受信機の低雑音増幅器の前段に設置するアナログ自己干渉キャンセラ (ASIC: Analog Self-Interference Canceller), 及びデジタル自己干渉キャンセラ (DSIC: Digital Self-Interference Canceller) の構成法の提案, 計算機シミュレーションによる性能評価, 送受信機を製作した実験的な検証が多数報告されている. また, 主に無線 Local Area Network (LAN) システムのリンクバジェットを仮定した自己干渉の抑圧レベルの検討などシステム応用の検討も行われている. しかしながら, LTE などのセルラシステムは, 無線 LAN に比較してカバレッジエリアが広いためユーザ端末の送信電力が高く, 受信品質を満たすために要求される自己干渉抑圧レベルは高くなる.

本課題研究では, 将来の 5G セルラシステムへの適用を仮定し, 既存の HD-FDD, HF-TDD に比較したスループット (周波数利用効率) の増大, 伝送遅延の短縮を目的として, FD の物理チャンネル多重法, 自己干渉キャンセラ構成を検討し, 数値解析, 及び計算機シミュレーションにより特性を評価する. 所要の自己干渉の抑圧レベル, 伝送遅延は, 数値解析により評価した. また, リンクレベルシミュレーションにより, 一対の送信機と受信機をマルチパスフェージンチャンネルの無線伝搬路を介して接続し, 受信機で測定した平均ブロック誤り率 (BLER: Block Error Rate) 特性を評価した. 前述のように, 自己干渉を抑圧するアンテナアイソレーション, ASIC の自己干渉抑圧レベルの性能に関しては, 既報の論文での実現性能を用いた.

### 4. 研究成果

(1) キャリア周波数スワップを用いる HD-FDD における送受信機構成及びフィードバック情報の低減効果の検討

従来の HD-FDD における CQI などのフィードバック情報のオーバーヘッドを低減することを目的として, 図 1 に示すサブフレームの先頭に多重したチャンネル状態情報 (CSI: Channel State Information) 推定用参照信号 (RS) を多重する上り及び下りリンクのキャリア周波数 (それぞれ  $f_{UL}$ ,  $f_{DL}$ ) にキャリア周波数スワップを適用する方法を提案した.

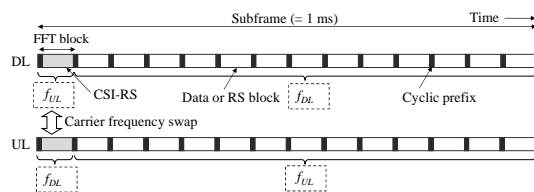


図 1. HD-FDD におけるキャリア周波数スワップの原理.

HD-FDD にキャリア周波数スワップを適用すると受信機に回り込む送信信号の自己干渉を抑圧するデュープレクサが 2 系列必要になる. そこで, キャリア周波数スワップに適

した送信/受信で異なるアンテナを用いることによるアンテナアイソレーション, ASIC, 及び DSIC を適用する送受信機構成を提案した. 提案の受信機構成により, セルラシステムの受信信号のレベルダイヤグラムでデュープレクサが不要な場合においても, 所要の平均 BLER を満たすレベルまで自己干渉を抑圧できることを確認した. また, LTE の下りリンクにおけるフィードバック情報の制御手順を基に, FDD にキャリア周波数スワップを用いることによる CQI, PMI 及び RI のフィードバック情報の低減効果を示した.

(2) 上り及び下りリンクのトラフィックが非対称な場合における FD のスループット (周波数利用効率) 改善法の提案

シンボル繰返しを適用したときの FD の適用領域の増大効果

セルラシステムでは, 下りリンクのトラフィックが上りリンクのそれに比較して高い非対称なトラフィック分布になっている. FD を仮定した場合に, トラフィック分布が低い上りリンクのデータチャンネルにシンボル繰返しを適用する物理チャンネル多重法を提案した. 提案法では, 上りリンクのデータチャンネルにシンボル繰返しを適用することにより, 基地局における所要受信 Signal-to-Noise power Ratio (SNR) を満たすために必要なシンボル当たりの送信電力を低減できる. 従って, ユーザ端末の送信電力を低減することにより, 受信機に回り込む自己干渉を低減でき, その結果 FD を適用できるカバレッジエリアを増大できる.

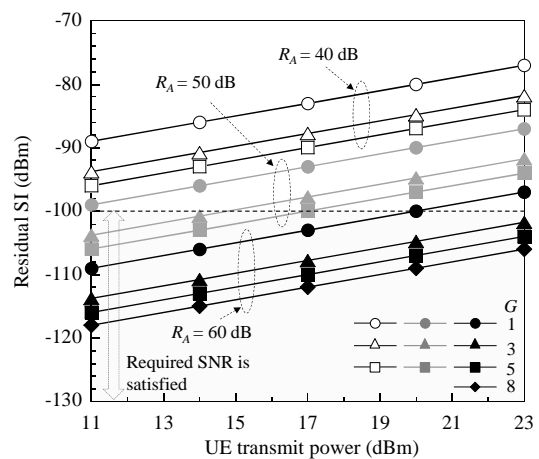


図 2. 上りリンクにシンボル繰返しを適用した場合のユーザ端末 (UE) の送信電力に対する残留 SI レベル.

図 2 に基地局及びユーザ端末に FD を用いた場合 (Bidirectional FD と呼ばれている) における上りリンクにシンボル繰返しを用いたときの, ユーザ端末の送信電力に対する残留自己干渉 (SI) レベルを示す. 図中,  $G$  は, 情報シンボルの繰返しファクタを表す. アンテナアイソレーション及び ASIC を含む SI 抑圧レベル  $R_A$  を 40, 50 及び 60 dB とした. DSIC の SI 抑圧レベル  $R_D$  を 60 dB とした. 図中, 残留 SI が, -100 dBm 以下の領域が LTE で規

定されている参照感度レベルを満たす領域である。図より、ユーザ端末の最大送信電力 23 dBm を仮定した場合  $R_A = 40$  dB の場合には、シンボル繰り返しの効果は殆ど見られない。一方、 $R_A = 50$  及び 60 dB の場合には、提案のトラヒックの非対称性に応じたシンボル繰り返しを用いることにより、FD のユーザ端末の送信電力（カバレッジエリア）に対する適用領域が拡大できている。

### サブフレーム単位のシンボル繰り返しを用いる物理チャンネル多重法

TDD は、5G 方式への適用が検討されている。TDD に FD を適用した場合、元々トラヒックの低いリンクのスループットの増大効果は大きいものの、トラヒックの高いリンクのスループットの増大効果は小さい。そこで、トラヒックの大きいリンクの周波数利用効率を向上することを目的として、前述のトラヒック分布の低いリンク（一般には上りリンク）へのシンボル繰り返しの適用法を進展させて、1 無線フレーム内の複数サブフレームにサブフレーム単位のシンボル繰り返しを適用する物理チャンネル多重法を提案した。図 3 に、サブフレーム単位のシンボル繰り返しを用いる物理チャンネル多重法を示す。下りリンクのサブフレームが割り当てられていないユーザに対しては、基地局のみが FD を行う BS FD モードになる。BS FD モードのユーザ端末は、指向性ビームを用いる ASIC 及び DSIC で同一チャンネル干渉を低減できる。上りリンクとともに下りリンクのサブフレームが割り当てられている Bidirectional FD モードのユーザ端末に対しては、アンテナアイソレーション、ASIC、及び DSIC で自己干渉を低減できる。

また、周辺セルからの同一チャンネル干渉がある場合に FD の周波数利用効率の劣化を改善するために、特に遅延の要求条件が厳しいユーザ端末に FD を適用したときに、セル間干渉コーディネーション (ICIC: Inter-Cell Interference Coordination) を行い、FD を適用したユーザ端末に対して同一チャンネル干渉を低減する方法を提案した。これらの特許出願を行った。

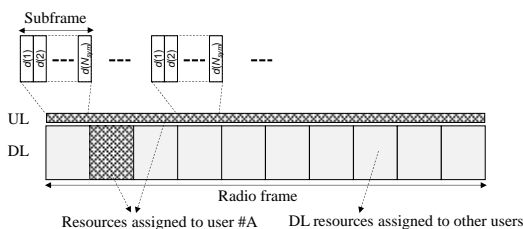


図 3. サブフレーム単位のシンボル繰り返しを用いる物理チャンネル多重法

### (3) フルデュプレクス(FD)送受信機におけるデジタル自己干渉キャンセラの自己干渉抑圧レベルの目標値の検討

FD を用いる直接変換送受信機において、自己干渉(SI)、送信部電力増幅器の 3 次の非線形歪

み、受信 RF 回路の 2 次及び 3 次の非線形歪み、アナログ・デジタル変換器(ADC)の量子化雑音を考慮した場合の DSIC の所要自己干渉(SI)抑圧レベルを検討した。既存の研究報告に基づいて、送信機及び受信機で異なるアンテナを用いる 40 dB のアンテナアイソレーション、ASIC の 40 dB の SI の抑圧レベルを仮定した。図 4 に示すように、ADC の量子化ビット数が 10 ビット、及びユーザ端末の送信電力が 23 dBm のとき、DSIC の所要 SI 減衰量は 50 dB 程度になる。また、送信電力が 23 dBm、アンテナアイソレーション及び ASIC の自己干渉減衰量が 40 dB のとき、自己干渉に起因して ADC の実効的量子化ビット数は、6 ビット程度減少することを示した。

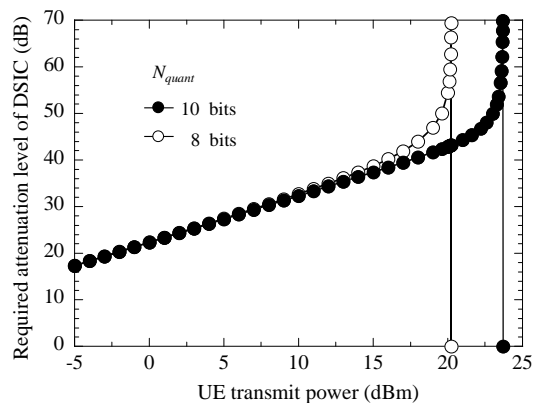


図 4. ユーザ端末(UE)の送信電力に対する DSIC の所要 SI 抑圧レベル。

### (4) FD における繰り返しデジタル自己干渉キャンセラ構成の提案と誤り率評価

図 5 に示す自己干渉及び希望波信号のシンボルレプリカを交互に推定して受信信号から差し引く繰り返し DSIC 構成を提案した。提案の構成では、自己干渉の電力レベルが受信信号レベルよりも高いため、まず、送信シンボルを用いて FFT 処理後のサブキャリア信号から RF 送信及び受信回路の振幅及び位相変動に相当する RF 回路応答を推定する。受信信号から自己干渉シンボルレプリカを差し引いた後、下りリンクのチャンネル応答の推定、及び復号ビットから受信シンボルレプリカを推定する。以降、自己干渉と受信信号のシンボル推定を交互に更新する。

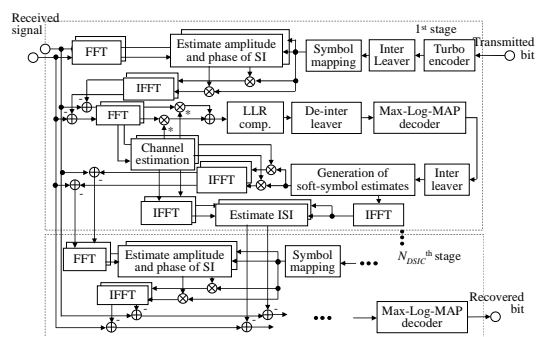


図 5. 繰り返し DSIC 構成

計算機シミュレーション結果より、DSIC

が 50 dB の自己干渉減衰量を実現する  $SI/S = 50$  dB の条件において ( $S$  は希望波信号電力), 自己干渉の RF 回路応答を高精度に推定した場合には繰り返し数が 1 で自己干渉無しの場合とほぼ同等の BLER 特性が実現できることを示した。また, 下りリンクのチャネル応答を RS を用いて推定した場合, 繰り返し数が 2 のときの平均 BLER が  $10^{-2}$  を満たすための所要平均受信 SNR の自己干渉無しの場合からの劣化を約 0.5 dB に抑えられることを示した。

図 6 に AD 変換器の量子化ビット数をパラメータにしたときの平均受信 SNR に対する平均 BLER 特性を示す。繰り返しデジタル自己干渉キャンセラを用いたとき, 平均 BLER が  $10^{-2}$  を満たすための所要平均受信 SNR の SI 無しの場合からの劣化を低いレベル抑えるためには, ADC の量子化ビットは 10 ビット程度必要であることがわかる。また, 送信電力が 10 dB 増大すると所要の受信 SNR を満たすための ADC の量子化ビット数を 1 - 2 ビット増大する必要があることを示した。

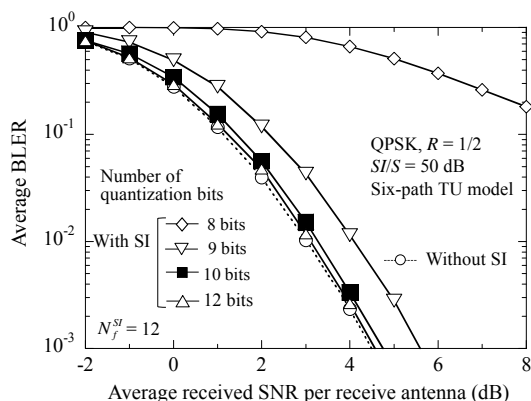


図 6. ADC の量子化ビット数をパラメータにしたときの平均受信 SNR に対する平均 BLER 特性。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

T. Ohtomo, H. Yamada, M. Sawahashi, and K. Saito, "Performance of Alternately Iterative Digital Self-Interference Canceller for OFDM Using Full Duplex," Proc. The 23<sup>rd</sup> Asia-Pacific Conference on Communications, APCC2017, 11-13 Dec. 2017.

H. Yamada, T. Ohtomo, M. Sawahashi, and K. Saito, "Effect of Quantization Noise on Iterative Digital Self-Interference Canceller for OFDM Employing Full Duplex," Proc. The 14th IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium, APWCS2017, 23-15 Aug. 2017.

山田 大貴, 大友 崇裕, 佐和橋 衛, 齊藤 敬佑, "Full Duplexを用いるOFDMにおける繰り返しデジタル自己干渉キャンセラの量子化ビット数の影響," 電子情報通

信学会 信学技報RCS2017-82, 2017年6月.  
大友 崇裕, 山田 大貴, 佐和橋 衛, 齊藤 敬佑, "Full Duplexにおける繰り返しデジタル自己干渉キャンセラの特性," 電子情報通信学会 信学技報RCS2017-36, 2017年5月.

大友 崇裕, 岩澤 陽平, 佐和橋 衛, 齊藤 敬佑, "Full Duplexにおける繰り返しデジタル自己干渉キャンセラのブロック誤り率特性," 電子情報通信学会 2017年総合大会, B-5-88, 2017年3月.

Y. Iwasawa, T. Ohtomo, M. Sawahashi, and K. Saito, "Effect of Data Channel Multiplexing Using Symbol Repetition Considering Asymmetric Traffic Load for Full Duplex," Proc. The 19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC2016, 13-16 Nov. 2016.

大友 崇裕, 岩澤 陽平, 齊藤 敬佑, 佐和橋 衛, "Full Duplexにおける非対称トラヒックを考慮したデータチャネルのシンボル繰り返しの効果の基本検討," 電子情報通信学会 信学技報RCS2015-348, 2016年3月.

大友 崇裕, 岩澤 陽平, 齊藤 敬佑, 佐和橋 衛, "Full Duplexにおけるデジタル自己干渉キャンセラの基本特性," 電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会, B-5-78, 2016年3月.

大友 崇裕, 齊藤 敬佑, 佐和橋 衛, "非対称トラヒックを考慮したFull Duplexのリソース多重法の基本検討," 電子情報通信学会2015年ソサイエティ大会, B-5-2, 2015年9月.

大友 崇裕, 齊藤 敬佑, 佐和橋 衛, "キャリア周波数スワップを用いるFDDの送受信機構成及びフィードバック情報の低減効果の考察," 電子情報通信学会 信学技報RCS2015-56, 2015年6月.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: ユーザ端末および無線基地局

発明者: 佐和橋 衛, 坪内 淳, 岸山 祥久

権利者: 株式会社 NTT ドコモ

種類: 特許

番号: 特願 2018-87480

出願年月日: 2018 年 4 月 27 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐和橋 衛 (SAWAHASHI, Mamoru)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号: 50449287