

同一周波数同時送受信方式を用いた無線システムの開発

Development of Full Duplex Radio System

小島 和也 鳥山 泰弘 谷口 徹
Kazuya Kojima Yasuhiro Toriyama Toru Taniguchi

要 旨

第5世代モバイル通信システムでは数Gbps以上の伝送速度が目指されており、そのモバイル基地局とコアネットワークの間を柔軟に接続可能な無線バックホールシステムについても大容量化が求められている。当社は、大容量無線バックホールシステムの実現を目指して、従来の時分割複信 (Time Division Duplex : TDD) や周波数分割複信 (Frequency Division Duplex) とは異なる新たな無線複信方式 - Directional Division Duplex (DDD) - を採用した40GHz帯固定無線システムを開発し、フィールド実験を行った。このDDD方式は、同一無線周波数チャネル、同一偏波で同時に送受信を行う複信方式であり、TDD方式やFDD方式に比べて、2倍の周波数利用効率を達成できる。

Abstract

Because of growing demand in recent years of mobile communications, it is aimed to achieve more than multi-Gbps transmission speed in 5th Generation (5G) mobile networks. It is indispensable to develop more high-speed wireless backhaul systems to connect flexibly between mobile base station and core network. Therefore, JRC proposes a full duplex radio system in same polarization, Directional Division Duplex (DDD). To investigate the feasibility, we have developed and fabricated the radio equipment for 40 GHz-band fixed wireless system which employs DDD, and performed a field experiment of the DDD radio system. The DDD is a radio duplex system that transmits and receives at the same time by using the same radio frequency channel and same polarization, and DDD radio system can ideally achieve twice frequency utilization efficiency as that of the traditional duplex system of Time Division Duplex (TDD) or Frequency Division Duplex (FDD) .

1. まえがき

近年の移動体通信の多様化と需要の拡大を受けて、第5世代モバイル通信ネットワークでは数Gbps以上の伝送速度が目指されており、モバイル基地局とコアネットワークの間を柔軟に接続可能な無線バックホールシステムは大容量化が求められている。また、電波利用ニーズの拡大に伴い無線周波数の逼迫が深刻化しており、周波数利用効率の向上に向けた取り組みが重要視されている。

そこで、当社は大容量無線バックホールシステムの実現を目指して、同一周波数同時送受信が可能な無線複信方式 (本方式を本稿ではDirectional Division Duplexと呼び、DDDと略す) を提案している^{(1), (2)}。無線複信方式とは送受信をやり取りする無線伝送方式であり、従来方式として送受信を短時間で交互に切り替えて伝送する時分割複信 (Time Division Duplex : TDD) や送受信を異なる無線周波数チャネルで伝送する周波数分割複信 (Frequency Division Duplex : FDD) があった。提案するDDD方式は、同一無線周波数チャネル、同一偏波で同時に送受信を行う複信方式であり、TDD方式やFDD方式に比べて、およそ2倍の周波数利用効率を達成できる。

今回、無線バックホールシステムとして利用可能な、DDD方式を採用した40GHz帯固定無線システムを開発しフィールド実験を行った結果、良好な伝送特性を得ることができたので、以下に報告する。

2. Directional Division Duplex (DDD) 方式

従来、マイクロ波帯やミリ波帯の固定無線システムでは、大容量伝送を実現するために変調信号の多値化が進められてきた。しかし、多値数 2^m (m は変調シンボルあたりに含まれる情報ビット数) を大きくするほど所要CNRが大きくなり、通信距離が短くなる短所があった。

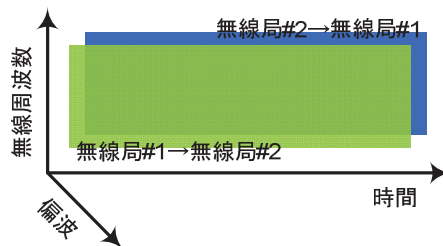


図1 DDD方式の信号伝送概念図
Fig.1 Conceptual view of signal transmission in DDD

一方、提案するDDD方式では、図1の信号伝送概念図に示す通り、二つの無線局 (無線局#1と無線局#2とする) 間を伝送する、無線局#1から無線局#2への信号と無線局#2から無線局#1への信号のどちらも同一無線周波数チャネル、同一偏波を用い、同時双方向伝送を行う。そのため、DDD方式は、TDD方式やFDD方式に対して2倍の周波数利用効率を

得ることができ、これらと等しい伝送容量を多値数 $2^{(m/2)}$ で達成できる。つまり、DDD方式は、通信距離を短くすることなく、従来方式と等しい伝送容量を実現することができる。

しかし、DDD方式は、同一無線周波数チャンネルかつ同一偏波で同時送受信であるがゆえ、図2に示すように、送信した信号がアンテナ端や構造物での反射により自局の受信回路へ回り込む。これを自己干渉信号と呼ぶ。自己干渉信号は、対向する無線局から送信された希望信号と合成され、回線品質を劣化させる恐れがある。ここで、回線品質とは伝送状態の良否であり、CINRで示される。希望信号電力を P_c 、自己干渉信号電力を P_i 、受信機雑音電力を P_n とした場合、CINRは、

$$\text{CINR} = \frac{P_c}{P_i + P_n} \quad (1)$$

となる。一方、自己干渉信号が無い場合の指標であるCNRは、

$$\text{CNR} = \frac{P_c}{P_n} \quad (2)$$

と表せる。これらの二つの式から、自己干渉信号電力 P_i が受信機雑音電力 P_n に比べて十分小さければCINRはCNRに近似でき回線品質に影響はないが、そうでなければその分回線品質は劣化する。したがって、希望信号を正しく復調するためには、CINRがCNRに近づくよう自己干渉信号を除去しなければならない。



図2 DDD方式における自己干渉信号
Fig.2 Self-interference signal in DDD

本課題に対して、今回、送受信間の空間アイソレーションが80dB以上の並列配置デュアルアンテナと、信号処理により自己干渉信号を抑圧する自己干渉キャンセラを組み合わせ、DDD方式を採用した無線装置を試作した。

3. 試作無線装置

試作した無線装置の主要諸元を表1に示す。今回、通信方式をシングルキャリア/DDD方式、無線周波数を40GHz帯、シンボル伝送速度を200Msymbol/secとし、QPSK、16QAM、64QAMの変調方式を用いることで、上下回線合わせて最大2Gbpsの実効伝送速度を達成した。ここで、実効伝送速度と

は、誤り訂正による冗長性や無線物理層での制御情報を除いたデータ伝送速度である。

表1 無線装置諸元

Table 1 Specification of radio equipment

| 項目 | 仕様 |
|----------|---|
| システム構成 | Point-to-Point/固定無線システム |
| 無線周波数 | 40GHz帯 |
| 通信方式 | シングルキャリア/DDD方式 |
| 変調方式 | QPSK, 16QAM, 64QAM (適応変調機能) |
| 送信電力 | +23.0dBm (QPSK), +20.4dBm (16QAM), +19.3dBm (64QAM) |
| 通信距離 | 最大2km |
| シンボル伝送速度 | 200Msymbol/sec |
| 実効伝送速度 | 最大2Gbps (上下回線合計) |
| インタフェース | 100/1000BASE-T |
| 外形寸法 | 300(W) × 150(H) × 50(D)mm |
| 質量 | 約5kg |

試作した無線装置の外観写真を図3に示す。本装置は、アンテナ、無線回路、及びベースバンド回路の全てを一つの筐体に収めた屋外設置一体型筐体にて実現した。また、本装置のブロック図を図4に示す。DDD方式では、無線回路のキャリア発振器とベースバンド回路のクロック発振器のそれぞれは、送信と受信で共用できる。そのため、A/D変換された後の受信信号に含まれる自己干渉信号に対して、キャリア周波数オフセットとクロック周波数オフセットを考慮する必要はない。



図3 試作無線装置
Fig.3 Photograph of radio equipment

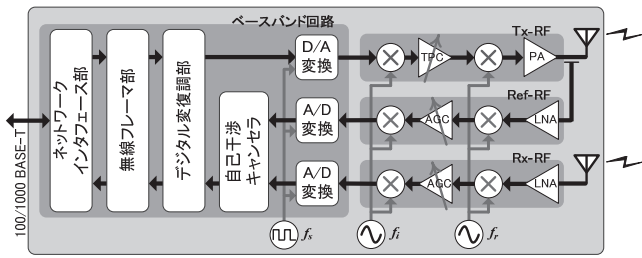


図4 無線装置ブロック図

Fig.4 Block diagram of radio equipment

4. 並列配置デュアルアンテナ

本装置では、自己干渉信号を除去する技術の一つとして、並列配置デュアルアンテナを採用した。今回採用した並列配置デュアルアンテナは、送信と受信の二つの同一偏波のアンテナを並列に配置させても、送信アンテナから受信アンテナへの漏れ込みが少ない、つまり、送受信間の空間アイソレーションが大きなアンテナである。これにより、送信信号が受信アンテナへ直接回り込むことで発生する自己干渉信号を受信側の無線回路に入力する前に抑圧することができる。

本装置に採用した並列配置デュアルアンテナの外観写真を図5に示す。本アンテナは、高効率かつ高利得を特長とする導波管スロットアレイアンテナで実現され、V偏波の二つのアンテナをH面方向水平に配置する。このアンテナによって送受信間の空間アイソレーションを80dB以上確保でき、自己干渉信号を大幅に抑圧することができる。

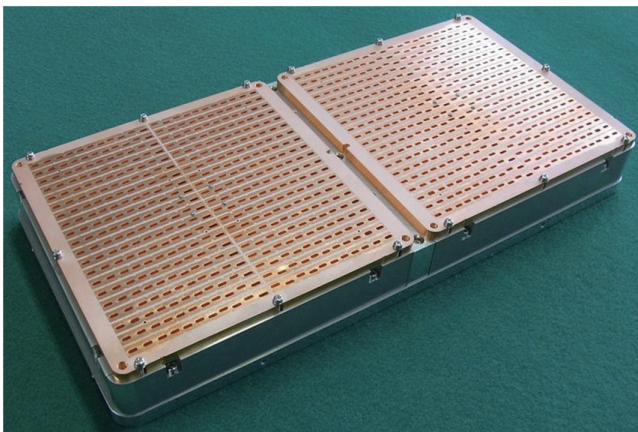


図5 並列配置デュアルアンテナ

Fig.5 Photograph of parallel arranged dual antenna

5. 自己干渉キャンセラ

無線装置の送信電力を+23dBm、及び前述したアンテナの空間アイソレーションを80dBとした場合、送信信号が受信回路へ直接回り込む自己干渉信号は-57dBmとなる。対向する無線局から送信された希望信号の受信電力が-70dBmであればキャリア電力対干渉電力比 (CIR) は-13dB

となり、自己干渉信号は希望信号に比べて大きくなる。この並列配置デュアルアンテナだけでは抑圧しきれない自己干渉信号の残留を、希望信号を適切に復調できる大きさへ抑圧するため、受信側ベースバンド回路に自己干渉キャンセラを適用する。

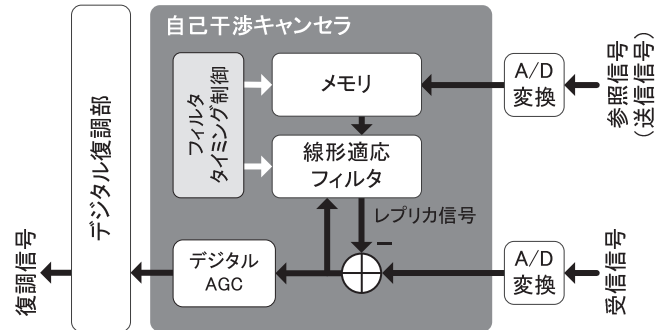


図6 自己干渉キャンセラ ブロック図

Fig.6 Block diagram of self-interference canceller

自己干渉キャンセラのブロック図を図6に示す。自己干渉キャンセラは、適応信号処理を用いて、受信信号に含まれる自己干渉信号成分を除去する回路である。図4に示したように、送信信号は送信アンテナから出力される一方で、自己干渉キャンセラの参照信号としても入力される。自己干渉キャンセラは、その参照信号を元に線形適応フィルタで自己干渉信号のレプリカ信号を生成した後、受信信号からレプリカ信号を減算することにより干渉信号を除去し、希望信号を抽出する。線形適応フィルタはLMSアルゴリズムを用い、受信信号からレプリカ信号を差し引いた誤差信号が最小となるようにレプリカ信号を生成する。

6. 無線システム性能

試作した無線装置に対して、実環境で想定する自己干渉信号を疑似的に与え、DDD方式の無線システム性能を評価した。評価系を図7に示す。評価条件の一例として、想定する自己干渉チャンネルモデルは、送信アンテナから受信アンテナへ直接漏れ込む成分を-57dBmの1波、及び構造物で反射する成分を希望信号に対して-6dB (2μs遅延) と-24dB (5μs遅延) の2波の固定値とした。

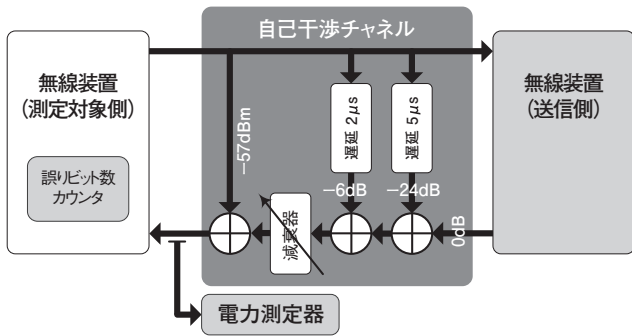


図7 無線システム性能評価系

Fig.7 Evaluation system of radio system performance

無線システム性能の評価結果として、図7の自己干渉チャンネルモデルにおけるビット誤り率特性を図8に示す。横軸は無線装置の受信回路に入力される希望信号電力、縦軸は誤り訂正前のビット誤り率をそれぞれ示す。本結果から、希望信号が -70dBm のとき、CIRは -13dB 以下で自己干渉キャンセラがなければ復調の引き込みができない状態にも関わらず、QPSKのビット誤り率は理論値とほぼ一致することが分かる。つまり、自己干渉信号が存在しても、本無線装置であればこれを除去することができ、TDD方式やFDD方式の従来方式を用いた無線装置と遜色無い通信品質にてDDD方式を実現できることを確認した。

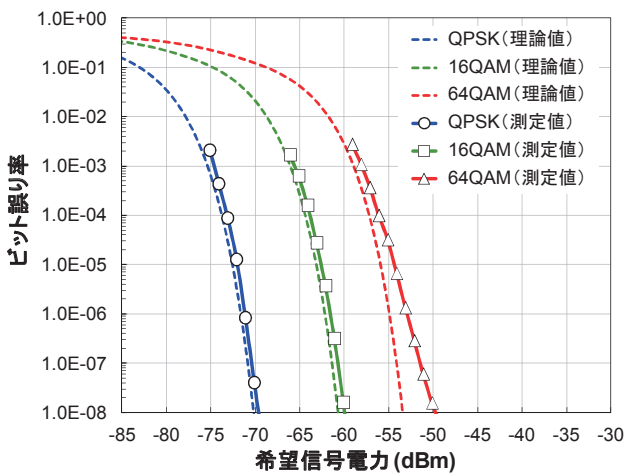


図8 ビット誤り率特性

Fig.8 Performance of bit error rate

7. フィールド実験

試作した無線装置を東京工業大学 大岡山キャンパスの建物4棟の屋上に設置することで3回線の無線ネットワークを構築し、フィールド実験を行った。構築した無線ネットワーク構成を図9に示す。

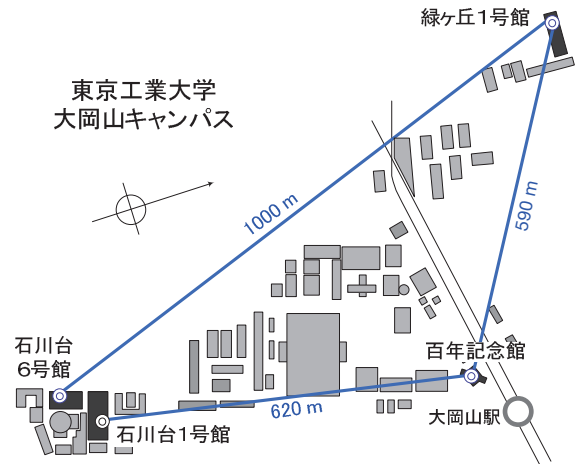


図9 フィールド実験時の無線ネットワーク構成

Fig.9 Radio link network of the field experiment

実環境において、雨天時の構造物等からの反射は大きく変動する。フィールド実験で得られた雨天時の自己干渉キャンセラの性能を図10に示す。図10は図9に示す通信距離1000mの無線回線の性能を示しており、上段は時刻に対する希望信号の変化、中段は自己干渉信号の変化、下段は自己干渉キャンセラで抑圧した自己干渉信号（即ちキャンセル量）の変化をそれぞれ示す。なお、0時以前から12時過ぎまでが雨天で、その後に雨が止んだ際の様子を表している。本図から、雨天の影響によって自己干渉信号が大きく変動するが、それに自己干渉キャンセラが追従する結果を得た。自己干渉信号と自己干渉キャンセラのキャンセル量の変動量がほぼ同等であることから、雨天などによる電波伝搬環境の変動時においても、自己干渉キャンセラが有効に動作し、適切な通信品質を維持できることが分かった。

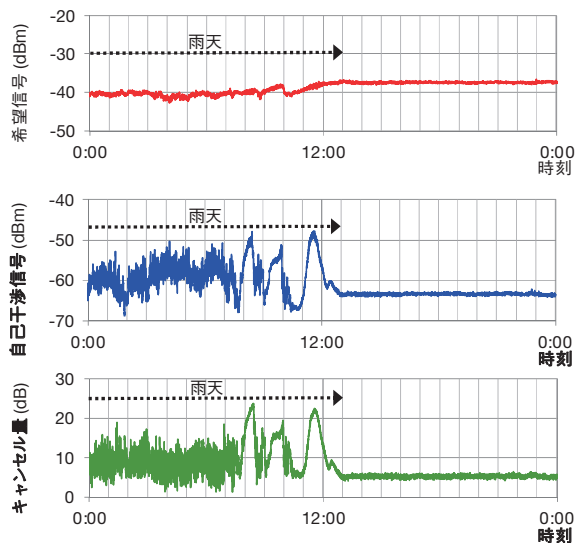


図10 雨天時の自己干渉キャンセラ性能

Fig.10 Cancelling performance in the rainy weather

8. あとがき

本稿では、同一無線周波数チャネル、同一偏波で同時に送受信を行うDDD方式を提案し、従来のTDD方式やFDD方式に対して2倍の周波数利用効率を実現できることを示した。次に、DDD方式を用いた40GHz帯固定無線システムについて説明し、DDD方式が持つ自己干渉信号の抑圧の課題は、空間アイソレーションが80dB以上の並列配置デュアルアンテナと信号処理にて自己干渉信号を除去する自己干渉キャンセラを用いることで、克服できることを述べた。更に、試作した無線装置を用いて無線システム性能評価とフィールド実験を行い、無線全二重方式で伝送できることを実証するとともに、TDD方式やFDD方式と比べても遜色無い通信品質を実現したことを述べた。

今後、様々な気象条件に対する回線状態の収集と解析を長期間にわたって実施し、DDD方式の安定性と有効性を確認する。また、大容量無線バックホールシステムの提供を目指し、高性能化、小型化、低価格化に向けた研究開発活動を継続する予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御指導頂いた東京工業大学 安藤真教授、東京工業大学 松澤昭教授に感謝申し上げます。なお、本研究は、総務省の委託研究「電波資源拡大のための研究開発」の一環として実施されました。

参考文献

- (1) K. Kojima, T. Taniguchi, M. Nagayasu, Y. Toriyama and M. Zhang, "A Study of Interference Canceller for DDD System on Millimeter-Wave Band Fixed Wireless Access System," in 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, April 2015.
- (2) K. Akahori, T. Taniguchi, M. Nagayasu, Y. Toriyama, K. Kojima and M. Zhang, "Implementation of Millimeter Wave Band DDD Radio System," 2016 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Austin, Texas, January 2016.

用語一覧

CINR: Carrier power to Interference power and Noise power Ratio
(キャリア電力対干渉電力・雑音電力比)
CIR: Carrier power to Interference power Ratio
(キャリア電力対干渉電力比)
CNR: Carrier power to Noise power Ratio (キャリア電力対雑音電力比)
DDD: Directional Division Duplex (方向性分割複信)
FDD: Frequency Division Duplex (周波数分割複信)
LMS: Least Mean Square (最小平均二乗)
QAM: Quadrature Amplitude Modulation (直交振幅変調)
QPSK: Quadrature Phase Shift Keying (4位相偏移変調)
TDD: Time Division Duplex (時分割複信)