

# 超空間多重の研究

## Super Spatial Multiplexing in Communication Systems



田野 哲 (Satoshi DENNO, Ph. D.)

岡山大学 学術研究院環境生命自然科学学域 教授  
(Professor, Faculty of Environmental, Life, Natural Science and  
Technology, Okayama University)

電子情報通信学会

受賞：電子情報通信学会 通信ソサイエティ論文賞 (2019年)

The 25th International Symposium on Wireless Personal  
Multimedia Communications (WPMC2022), Contribution to  
Academic Research 賞 (2015年)

電子情報通信学会 論文賞 (1996年) 他

著書：通信方式, オーム社出版 (2013年) 他

研究専門分野：通信工学

### あらまし

本研究では空間多重数を従来不可能とされていたレベルまで増やすことで、有線・無線通信の高速化を目的とする。この目的を実現する「超空間多重」技術を提案する。提案法は、無線通信で言うところのアップリンクとダウンリンクの両方の高速化を可能にしつつ、優れた通信特性を達成する。また、提案法は従来法に比較して低演算量で実装できることを示す。計算機シミュレーションにより、その優れた通信特性を定量的に明らかにする。

### 1. 研究の目的

社会の発展とともに、インフラの一部である通信ネットワークの高速化が求められている。光ファイバ通信に代表される有線通信ネットワークにおいては、波長分割多重により通信が著しく高速化された。空間多重による更なる高速化も検討されている。無線通信では様々な技術を駆使して Gbps クラス近い通信を達成している。それらの技術の中でも、やはり空間多重技術は高速化を達成するための中心的存在である。但し、

空間多重数は物理的なパラメータに大きく制約される。例えば、無線通信の場合には送受信機のアンテナ数に空間多重数が制限される。そこで、本研究では、空間多重数に関するアンテナ数の制限を緩和し、アンテナ構成は同一であっても従来より空間多重数を増大させ、通信を高速化することを目的とする。

### 2. 研究の背景

複数のアンテナを送受信機に備え、空間多重を行うことで通信の高速化が図れることが理論的に示され、その後、実験でも実証された[1]。これを契機に様々な空間多重技術が研究されてきた。それらの研究成果はセルラー無線通信や無線LANに適用され、通信速度高速化の中心的な役割を果たしてきた。アンテナ数を増やせば、空間多重数を増大でき通信の高速化が可能になるため、第五世代セルラーシステムではマッシュアップ MIMO\*1 と呼ばれる多数のアンテナを基地局に設置するシステムも導入された。但し、ユーザあたりの通信速度を向上させるには、基地局のアンテナ数だけでなく、端末のアンテナ数も増やす必要があると考えられてきた。

端末アンテナ数を増やすことは簡単ではない。そこで、アンテナ構成を変えることなく、空間多重数を増やし、ユーザ通信速度の高速化を狙う過負荷 MIMO の研究が進められている。例えば、非線形信号処理である MLD (Maximum Likelihood Detection)\*2 [2] や、GaBP (Gaussian Belief Propagation)\*3 [3] などが研究されてきた。MLD は優れた通信特性を発揮するものの、非常に演算量が多く、実用には適さない。GaBP は MLD に比較すれば遥かに演算量は少ないが、空間多重できる信号数が少なく、大幅な高速化は困難である。

そこで、本研究ではアンテナ構成を変更することなく、低演算量ながら従来より遥かに多数の信号を空間多重できる「超空間多重」技術を研究する。

### 3. 超空間多重

本研究の研究成果は無線通信だけでなく、光ファイバ通信にも適用できるが、用語の混乱を避けるため、無線通信を対象として以下の説明を行う。まず、図 1 に本研究が対象とする無線通信のシステムモデルを示

# 超空間多重の研究

## Super Spatial Multiplexing in Communication Systems

す。同図では左側の端末と右側の基地局間で通信が行われる。端末から基地局への通信はアップリンクと呼ばれ、逆に基地局から端末への通信はダウンリンクと呼ばれる。上記のように、基地局には比較的多くのアンテナが設置できるのに対し、端末のアンテナ数は制限される。端末アンテナ数を  $N_T$ 、基地局のアンテナ数を  $N_B$  と表すと、 $N_T < N_B$  である。このシステムにおいて、従来の空間多重では  $N_T$  信号までしか多重できない。これに対し、過負荷 MIMO では  $N_B$  信号を多重する。但し、従来は過負荷 MIMO の研究はダウンリンクのみを対象としていた。これに対して、本研究の超空間多重では、アップリンクとダウンリンクの両方において  $N_B$  信号の空間多重を狙う。また、従来の過負荷 MIMO の研究では過負荷率  $N_B/N_T$  は 1.5 程度であったが、本研究の超空間多重では過負荷率  $N_B/N_T=2,3$  を狙い、従来法の数倍の高速化を目指す。

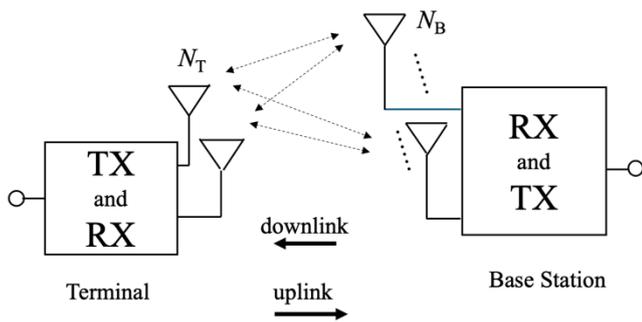


図 1 システムモデル

### (1) ダウンリンクの高速化

ダウンリンクでは、基地局の  $N_B$  アンテナから信号を送信し、端末の  $N_T$  アンテナで受信する。端末の消費電力の制限より、受信機の演算量を極限まで低減するため、本研究では基地局側でプリコーディングを行う。その場合でも、 $N_B$  信号を空間多重するために、受信側にフィルタを用いる構成を考案した。チャンネル行列を特異値分解した場合に得られる右特異ベクトルと左特異ベクトルの積が受信フィルタとして準最適であることを証明した。この受信フィルタを用いても、チャンネルの固有値は不変で  $N_T (< N_B)$  であり、通常の線形プリコーディングでは十分な伝送特性が期待できない。そこで、次に述べる新しいプリコーディング法を考案した。

### ・等利得変換による非線形プリコーディング

チャンネル行列を上三角行列とユニタリ行列に分解し、この上三角行列をプリコーディングに用いる。この分解において、対角要素を全て等しくする等利得変換を用いる。この等利得変換は固有値分解を何度も必要とするため、若干演算量が増大する。但し、プリコーディング処理は比較的消費電力に余裕のある基地局で行うため、大きな問題とはならない。等利得変換により得られた上三角行列を用いて非線形プリコーディングを行うことが、チャンネル固有値不足問題の解となることを証明した。このプリコーディングにより、端末では先ほど述べた線形フィルタとモジュロ処理のみで復調が可能になる。即ち、このような簡易な処理で、 $N_T$  アンテナで受信した信号から、 $N_B$  信号の復調を可能にした。

### (2) アップリンクの高速化

アップリンクでは、端末の  $N_T$  アンテナから信号を送信し、基地局の  $N_B$  アンテナで受信する。超空間多重ではアップリンクでも  $N_B$  信号を空間多重する。即ち、送信アンテナ数  $N_T$  以上の信号を空間多重する必要がある。そこで、アップリンクにおいても(1)で考案した等利得変換による非線形プリコーディングを適用する。アップリンクの超空間多重では、空間多重される信号数は受信アンテナ数と同数であるため、ダウンリンクで用いた受信フィルタは必要ない。

### ・繰返し雑音除去

提案する超空間多重法の特性を詳細に分析した。その結果、非線形プリコーディングは固有値の数が少ない通信路でも優れた特性を発揮するが、非線形プリコーディングの構造に起因した特性劣化があることを見出した。即ち、受信機で発生する雑音に加えて、非線形プリコーディングに起因した雑音信号が受信信号に混入することを証明した。この雑音は送信信号に起因していることを、理論的に示した。

本研究では、この雑音を除去する技術を提案した。提案法で雑音信号も勘案した受信信号の尤度関数を生成する。この尤度関数と誤り訂正復号器

# 超空間多重の研究

## Super Spatial Multiplexing in Communication Systems

出力の軟判定信号を用いて受信信号の軟判定信号を推定し、誤り訂正復号器に入力する。上記の処理を繰り返すことでさらなる特性改善が期待される。

### ・ 繰り返し雑音除去の演算量低減

提案する雑音除去法により特性の改善が期待されるが、受信信号の軟判定信号推定時に、演算量の多い最適値探索が必要となる。そこで、この演算量を低減する方法を考案した。考案した方法では誤り訂正出力の軟判定信号を元に、探索空間を制限し、演算量を低減する。

## 4. シミュレーション

### (1) ダウンリンクの特性

図2にダウンリンクのための超空間多重法の平均ビット誤り率(BER)特性を示す。横軸は1ビット当たりのエネルギー対雑音密度比( $E_b/N_0$ )、縦軸はBERである。同図では、端末アンテナ数  $N_T$  が2本、基地局アンテナ数  $N_B$  が4本と6本の特性を表している。空間多重数  $N_S$  は基地局アンテナ数と同数である。同図における従来法とは、等利得変換の代わりに Sorted QR 変換<sup>\*4</sup>を用いた時の特性である。同図に示すように、4信号を空間多重しても、2本の受信アンテナで復調できることを示している。6信号を空間多重数しても、高速化に伴い所要  $E_b/N_0$  は大きくなるが、フロア誤りのない優れた特性を達成している。即ち、従来法に比較して2~3倍の高速化が可能になった。

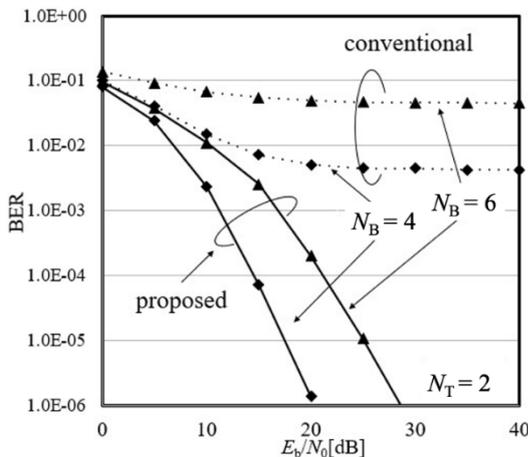


図2 ダウンリンクにおける提案法の通信特性

### (2) アップリンクの特性

図3にアップリンクのための超空間多重法の BER 特性を示す。同図では端末アンテナ数  $N_T$  は2本、基地局アンテナ数  $N_B$  は4本と6本、8本の特性を表している。空間多重数  $N_S$  は基地局アンテナ数と同数である。また、繰り返し雑音除去の繰り返し数は2回である。空間多重数が増え、高速化されるにつれ所要  $E_b/N_0$  は大きくなるが、フロア誤りのない優れた伝送特性を達成している。特に、基地局アンテナ数  $N_B$  が4本から6本に増えると、ダイバーシチ利得が増大し、BERの傾きが急峻になっている。図2と比較すると、雑音除去法の効果によりダウンリンクよりもアップリンクの方が優れた特性を達成することが分かる。即ち、アップリンクにおいても、従来法に比較して2~3倍の高速化が可能になった。

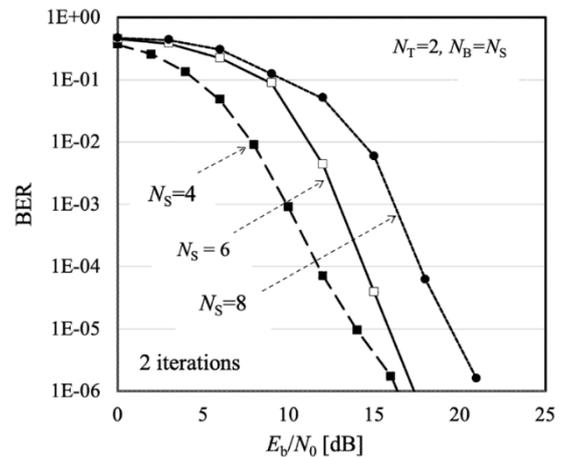


図3 アップリンクにおける提案法の通信特性

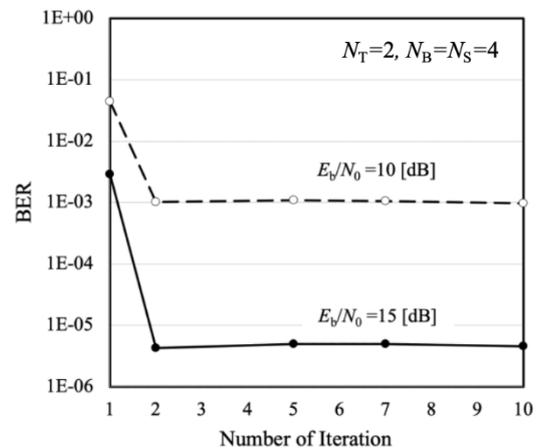


図4 提案法の繰り返し特性

# 超空間多重の研究

## Super Spatial Multiplexing in Communication Systems

図4に繰返し数に対するBER特性を示す。同図でも端末アンテナ数  $N_T$  は2本、基地局アンテナ数  $N_B$  は4本である。同図には  $E_b/N_0$  が10 dBと15 dBの特性を示している。同図から分かるように繰返すことで特性改善しているが、2回以上繰返しても特性改善しない。繰返す度に演算量が増えるため、2回繰返しが最良の選択である。

### (3) 演算量低減法の特性

図5に演算量低減法の特性を示す。同図でも端末アンテナ数  $N_T$  は2本、基地局アンテナ数  $N_B$  は4本である。同図には最大の探索空間である128ベクトルを50、10に減少した場合の特性も示している。探索空間を128ベクトルから50ベクトルに縮小したとしても、特性を1dB以下に抑えられた。

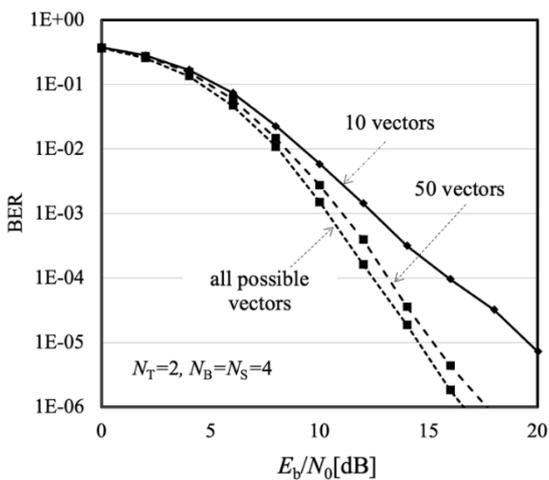


図5 演算量低減法の特性

### おわりに

本研究では有線・無線通信の高速化を可能にする「超空間多重」を研究した。超空間多重は従来法に比較して多くの信号を空間多重することにより通信を高速化する。ダウンリンクの超空間多重のために、等利得変換を用いたプリコーディングを考案した。アップリンクの超空間多重の特性改善のため、繰返し雑音除去も考案した。また、その演算量低減法も考案した。これらの技術により、従来法の2~3倍の高速化が可能になることを計算機シミュレーションにより示した。

### 用語解説

- \*1 MIMO: 複数のアンテナ送受信機に備え、複数の信号を同時にアンテナから送信する技術
- \*2 MLD: 受信信号から最も確からしい信号を検出する技術
- \*3 GaBP: 事後確率を最大化する信号検出法の近似法の一つ
- \*4 Sorted QR 変換: 上三角行列が昇順になるような上三角行列生成法

### 参考文献

- [1] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol.6, no.3, pp.311—335, 1998.
- [2] H. Yoshino, K. Fukawa, and H. Sukuki, "Interference cancelling equalizer (ICE) for mobile radio communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.46, no.4, pp. 849 - 861, 1997.
- [3] T. Takahashi, S. Ibi, and S. Sampei, "On normalization of matched filter belief in GaBP for large MIMO detection," *IEEE 84th Veh. Technol. Conf.*, 2016.

### 関連文献

- Satoshi Denno, Takumi Sugimoto, and Yafei Hou, "Overloaded MIMO Spatial Multiplexing Independent of Antenna Settings," The 2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall), Washington DC USA, Oct.7-10, 2024.
- Satoshi Denno, Takumi Sugimoto, and Yafei Hou, "Iterative Colored Noise Cancellation For Overloaded MIMO Systems With Precoding Based on Equal Gain Transform," The 2024 17th International Conference on Signal Processing and Communication System (ICSPCS2024), Gold Coast, Australia, Dec.16-18, 2024.
- Satoshi Denno, Takumi Sugimoto, Koki Matoba, and Yafei Hou, "Overloaded MIMO Spatial Multiplexing Independent of Antenna Setups," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E108-B, no.1, pp.1-13, 2025.

## 超空間多重の研究

### Super Spatial Multiplexing in Communication Systems

- Satoshi Denno, Takuya Sugimoto, and Yafei Hou, “Complexity Reduced Colored Noise Cancellation For Uplink Overloaded MIMO Spatial Multiplexing,” 2025 28th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Sofia Bulgaria, Nov.9-12, 2025.
- Satoshi Denno, Takumi Sugimoto, and Yafei Hou, “Uplink Overloaded MIMO Spatial Multiplexing With Iterative Colored Noise Cancellation in Massive MIMO Systems,” IEICE Trans. Commun., vol.E108-B, no.5, pp.656 - 664, 2025.
- Satoshi Denno, Takumi Sugimoto, and Yafei Hou, “Complexity Reduced Colored Noise Cancellation in Overloaded MIMO Spatial Multiplexing With Non-Linear Precoding,” IEICE Trans. Commun., vol.E109-B, no.3, pp. - , 2026.
- 的場 光輝, 田野 哲, 侯 亜飛 “過負荷 MIMO システムのための軟入力復号の低演算量化,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会 2024 年 9 月
- 杉本 匠, 田野 哲, 侯 亜飛, “送信アンテナ数が少ない MIMO システムの過負荷 MIMO による高速化とその特性改善法,” 電子情報通信学会 無線システム研究会 2023 年 12 月 15 日
- 杉本 匠, 田野 哲, 侯 亜飛, “等利得フィルタを適用した非線形過負荷 MIMO 通信方式,” 電子情報通信学会 無線通信システム研究会, 122 (252) 155-160 2022 年 11 月

この研究は、令和 3 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 4 ~ 6 年度に実施されたものです。