

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術 Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access



牟田 修 (Osamu MUTA, Dr. Eng.)

九州大学大学院 システム情報科学研究院 教授
博士(工学)

(Kyushu University, Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Professor.)

電子情報通信学会、IEEE

受賞：電子情報通信学会通信ソサイエティ論文賞(2020), 電子情報通信学会
通信方式研究会委員長賞(2014, 2015, 2017)

研究専門分野：移動無線通信

あらまし

次世代の移動通信システムの実現に向けて無線通信技術の更なる高度化、特に周波数帯域あたりの通信速度（周波数利用効率）の向上が重要となる。非直交多元接続（NOMA: Non-orthogonal multiple access）技術は、ユーザ間干渉を許容して同一の無線資源に複数ユーザを多重させる技術であり、従来の直交多元接続と比べて高い周波数利用効率の達成が期待される。NOMA では同一資源に重畳させるユーザを適切に選択するとともに各ユーザへの電力割当を最適化することによりユーザ間干渉を制御する必要がある。しかしながら、一般的にユーザ選択と電力割当の同時最適化に要する演算量はユーザ数と通信資源数の増加に伴い膨大となるため効果的な解法が必要となる。本稿では、上記の課題に対して同一の通信資源に重畳されるユーザ数は全体の一部であり疎性を有することに着目し、圧縮センシングに基づくユーザ選択・電力割当方式を提案する。提案方式を適用することで従来技術に比べて低演算量でありながら所望のサービス品質（QoS）を高い水準で保証できることを示す。さらに、提案方式

の考え方をセルラーシステム（異種無線網）における他セル干渉下での基地局の周波数・電力割当問題にも拡張可能であることを述べる。

1. 研究の目的

次世代の移動通信システムの実現に向けて無線通信技術の更なる高度化、特に周波数帯域あたりの通信速度（周波数利用効率）の向上が重要となる。非直交多元接続(NOMA: Non-orthogonal multiple access) 技術は、ユーザ間干渉を許容して同一の無線資源（Resource block）に複数のユーザを多重させる技術であり、従来の直交多元接続（OMA: Orthogonal multiple access）と比べて高い周波数利用効率の達成が期待される^[1, 2]。セルラーシステムの下り回線における NOMA の代表的手法として、逐次型干渉キャンセラ（SIC: Successive interference cancellation）を用いる方式（SIC-NOMA¹）が広く検討されている^[1, 2]。2 ユーザを非直交多重する場合、基地局の近傍に位置するユーザ宛の信号と遠方に位置するユーザ宛の信号を異なる電力レベルで同一の無線資源（RB: Resource block）に重畳する。このとき遠方ユーザ宛の信号の電力割当を近傍ユーザに比べて十分大きくすることで、ユーザ間干渉下においても遠方ユーザが自信号を検出できるようにする。一方、近傍ユーザの受信機では SIC 等の非線形信号処理を用いて遠方ユーザ宛の信号（ユーザ間干渉）を除去した後、自局宛の信号を復調する。したがって、NOMA では同一通信資源に重畳させるユーザを適切に選択するとともに各ユーザへの電力割当を最適化することでユーザ間干渉を制御する必要がある。しかしながら、一般的に、NOMA におけるユーザ選択・電力割当の同時最適化に要する演算量はユーザ数や無線資源数の増加に伴い膨大となるため低演算量かつ高性能な手法が求められる^[3, 4]。

本稿では、上記の課題に対して全ユーザのうち少数のユーザのみが同一の通信資源に重畳される状況が疎性を有することに着目し、NOMA における圧縮センシ

¹ Power-domain NOMA (PD-NOMA) とも呼ばれる。
本稿では、以後、NOMA と記載する。

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術

Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

ングに基づく低演算量のユーザ選択・電力割当方式を提案する^[5,7]。具体的には、雑音存在下において所望のサービス品質 (QoS) を満たすためのユーザ間の干渉電力の許容値 (干渉閾値) を理論的に導出するとともに、干渉閾値の条件下においてユーザ選択と電力割当の同時最適化問題を効率的に解く手法について述べる。計算機シミュレーション評価により、提案方式は総当たり法と比較して演算量を大幅に低減できること、および要求される QoS が実現可能である限り QoS 制約をほぼ満たしながら良好なユーザレートを達成できることを示す^[5,6]。さらに、提案方式の原理をセルラー通信 (マルチセルシステム) の下り回線における各基地局への電力・周波数資源割当の最適化問題に適用した場合の有効性について述べる^[7]。

セルラーシステムに非直交多元接続(NOMA)を適用した場合の干渉制御手法については従来から多数の検討が行われている。それらの手法は大別して、(1) MIMO (マルチアンテナ) 技術を用いて送信ビームの指向性を制御する方法と (2) 基地局の送信電力を制御して相互の電波干渉を軽減する手法に大別できる。

(1) の手法はアレイアンテナの空間自由度を活用して他システムへの干渉を抑圧するものである。しかし、周辺システムへの与干渉を軽減するには、基地局のアンテナ素子数が十分に多く、かつ周辺の電波状態を正確に把握し、それに基づき送信指向性制御と通信資源割当を実施する必要がある。一方、(2) の手法はセル中央とセル端に位置するユーザ間で受信電力の差異があることに着目した手法であり、基地局アンテナ素子数が少ない場合でも適用可能である。しかし、干渉を完全に抑圧できない (残留干渉が生じる) ことに加えて、基地局数が多い場合に送信電力の最適化に要する演算量が膨大となる。提案方式は (1) の技術と併用可能であり、また、(2) の技術に適用することで演算量の軽減効果を期待できる。

本稿では、数式表現に以下の記号を用いる。ベクトルは小文字の太字、行列は大文字の太字で表記する。上付き文字 $[b]$ は、 b 番目の RB を表す。 $\mathbb{R}^{a \times b}$ は実数を要素とする $a \times b$ 行列を表す。 $|\cdot|$ は絶対値を表す。 $\|x\|_1$ 、 $\|x\|_0$ はそれぞれユークリッドノルムおよび非零の要素数を表す。NOMA における遠方ユーザと近傍ユーザ

をユーザ A、B とし、それぞれ添え字の A、B を用いて表記する。

2. 下り回線 NOMA のシステム構成

シングルセルの下り回線 NOMA において、同じ通信資源 (RB : Resource block) に対して 2 ユーザ (基地局近傍と遠方のユーザ) が多重される場合を考える。以下、遠方ユーザと近傍ユーザをそれぞれユーザ A、ユーザ B と表記する。セル内に N_U 機のユーザ端末が存在し、RB 数を $N_{RB} = N_U/2$ と仮定する。基地局とユーザ端末はそれぞれ単一アンテナを具備する。また、チャネル推定は理想的に行われ、各ユーザのチャネル情報は基地局に通知され利用できるものとする。図 1 に OMA と NOMA における 2 ユーザ時 (ユーザ A、B) の通信資源割当の例を示す。OMA では各ユーザに直交した通信資源の割当を行う。一方、NOMA では複数ユーザで同一の通信資源 (周波数帯域) を共有する。図 1(b) に示すようにユーザ A とユーザ B が b 番目のリソースブロックに多重されている場合を考える。このとき、ユーザ B (近傍ユーザ) の受信信号は次式のように表される。

$$y_B^{[b]} = \underbrace{h_B^{[b]} \sqrt{\alpha_B^{[b]} p^{[b]} s_B^{[b]}}}_{\text{近傍ユーザ宛の信号}} + \underbrace{h_B^{[b]} \sqrt{\alpha_A^{[b]} p^{[b]} s_A^{[b]}}}_{\text{干渉信号}} + \underbrace{n_B^{[b]}}_{\text{雑音}}. \quad (1)$$

ここで、 $p^{[b]}$ は基地局の送信電力、 $h_i^{[b]}$ 、 $s_i^{[b]}$ 、 $i \in \{A, B\}$ はそれぞれユーザ i のチャネル応答、データ信号を表す。 $n_i^{[b]}$ はユーザ i に加わる平均0、分散 σ^2 の加算性白色ガウス雑音である。式(2)の右辺第二項は、ユーザ A による干渉信号を表す。また、 $\alpha_A^{[b]}$ と $\alpha_B^{[b]}$ は、それぞれユーザ A とユーザ B の電力割当係数である。ここで、 $\alpha_A^{[b]} + \alpha_B^{[b]} \leq 1$ とする。

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術 Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

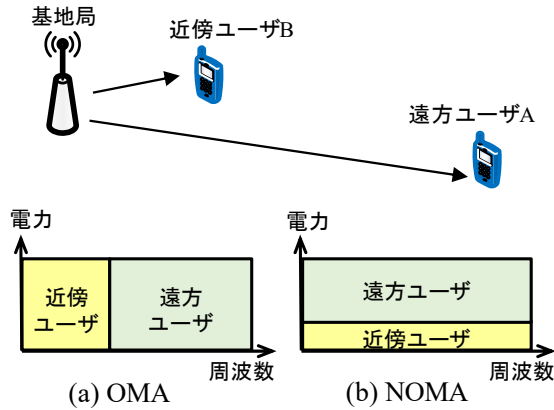


図 1 : OMA と NOMA における 2 ユーザ時の通信資源割当の例

一般的に NOMA では、遠方ユーザへの電力割当を近傍ユーザより大きくすることで、ユーザ間干渉が存在する場合にも遠方ユーザが自信号を検出できるようにする。一方、近傍ユーザの受信機では、遠方ユーザ信号（干渉信号）を検出できるように電力割当等が適切に与えられることを前提として、干渉信号（遠方ユーザ宛の信号）を SIC 等の信号処理により除去した後、自信号を復調する。ここで、理想的な SIC を仮定した場合、ユーザ B の受信信号は式(2)の第二項（遠方ユーザ宛の信号）を除去することにより次式で表される。

$$y_B^{[b]} \simeq h_B^{[b]} \sqrt{\alpha_B^{[b]} p^{[b]} s_B^{[b]}} + n_B^{[b]}. \quad (2)$$

したがって、ユーザ A と B の SINR はそれぞれ次のように与えられる。

$$\gamma_A^{[b]} = \frac{|h_A^{[b]}|^2 \alpha_A^{[b]} p^{[b]}}{|h_A^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p^{[b]} + N}, \quad \gamma_B^{[b]} = \frac{|h_B^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p^{[b]}}{N}. \quad (3)$$

ここで、 N は雑音電力を表す。ユーザ A とユーザ B の伝送レートはそれぞれ次式で与えられる。

$$r_A^{[b]} = \log_2(1 + \gamma_A^{[b]}) = \log_2\left(\frac{|h_A^{[b]}|^2 \alpha_A^{[b]} p^{[b]}}{|h_A^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p^{[b]} + N}\right), \quad (4)$$

$$r_B^{[b]} = \log_2(1 + \gamma_B^{[b]}) = \log_2\left(\frac{|h_B^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p^{[b]}}{N}\right).$$

比較として、 b 番目の RB における下り回線 OMA の伝送レートを以下に示す。

$$r_A^{[b]} = \alpha_A^{[b]} \log_2\left(\frac{|h_A^{[b]}|^2 \alpha_A^{[b]} p^{[b]}}{|h_A^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p^{[b]} + N}\right), \quad (5)$$

$$r_B^{[b]} = \alpha_B^{[b]} \log_2\left(\frac{|h_B^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p^{[b]}}{N}\right).$$

ここで、 b 番目の RB の電力と周波数帯域幅は、 $\alpha_A^{[b]}$ と $\alpha_B^{[b]}$ に分割されるとする。

1. 電力割当・ユーザ選択方式

3.1 問題設定

提案方式では全ユーザの合計伝送レートを最大化することを目的関数として電力割当とユーザ割当の最適化を行う。具体的には、以下の制約付き最大化問題を考える。

$$\max \quad R_i = \sum_{N_{RB}} (r_A^{[b]} + r_B^{[b]}), \quad (6)$$

$$\text{s.t.} \quad \alpha_A^{[b]} / \alpha_B^{[b]} \geq \gamma_{th}, \quad (7)$$

$$\alpha_A^{[b]} + \alpha_B^{[b]} \leq 1, \quad \forall b. \quad (8)$$

ここで、(6)は全ユーザの合計伝送レートを示す。(7)は遠方ユーザと近傍ユーザの電力比であり、SIC を適用できる条件を表す。 γ_{th} は遠方ユーザ（ユーザ A）における受信 SINR の所要値である²。本稿では、(7)が満たされる場合に SIC により干渉が完全に除去されるとする。なお、干渉電力が雑音電力に比べて十分に大

² 受信 SIR の所要値を γ_c 、受信 SINR の所要値を γ_{th} とする場合、常に $\alpha_A / \alpha_B \geq \gamma_c \geq \gamma_{th}$ が成立する。本稿では $\gamma_c = \gamma_{th}$ と仮定し、 $\alpha_A / \alpha_B \geq \gamma_{th}$ とする。

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術

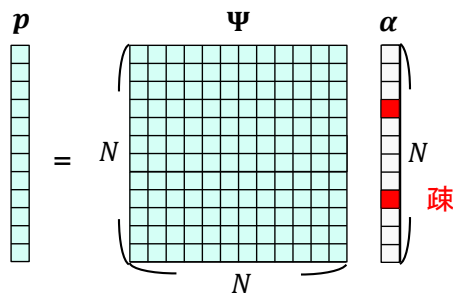
Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

きいとき、すなわち、 $|h_A^{[b]}|^2 \alpha_B^{[b]} p \gg N$ のとき、(7)は $\gamma_A^{[b]} \geq \gamma_{th}$ と等価になる。(8)はRBあたりの総電力が一定値以下であることを保証するための制約条件である。

3.2 圧縮センシングに基づく解法

圧縮センシングとは、連立方程式の真の解が疎性を有する（ほとんどの要素が0である）場合に、少ない観測値から真の解を求める手法である^[8]。例えば、以下の連立方程式において、既知の観測ベクトル $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{K \times 1}$ 、観測行列 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{K \times N}$ から、未知のベクトル $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ を求める場合を考える。

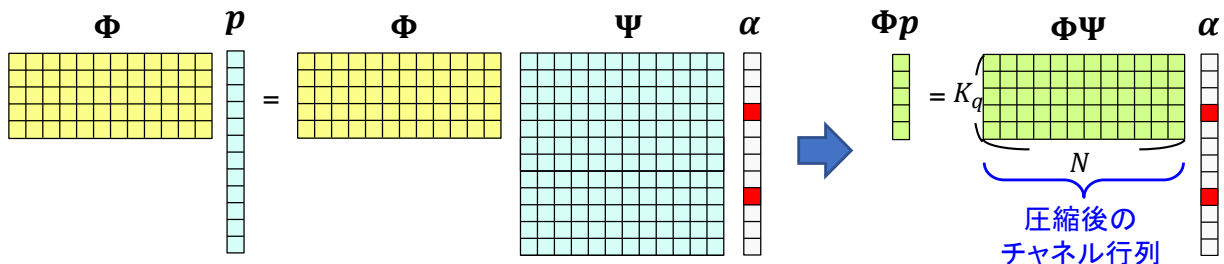
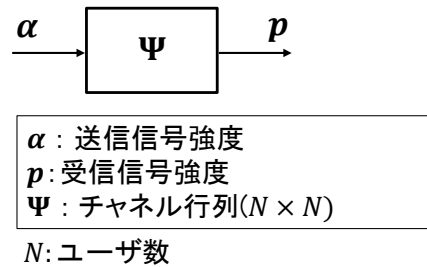
$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}. \quad (9)$$



(a) 一般的な線形システムの入出力関係

一般に、解 $\mathbf{x}$ の要素数が方程式の数より大きい場合 ($K < N$) には $\mathbf{x}$ は一意に定まらない。しかし、 $\mathbf{x}$ の非零要素数が K 以下であるとき（疎性を有するとき）、式(9)を満たす解を求めることができる。提案方式ではこの考え方を NOMA における電力割当・ユーザ割当問題に適用する。

図2に圧縮センシングに基づく電力割当・ユーザ割当方式（提案方式）の概略を示す。図2(a)に示すように $\alpha \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ を入力ベクトル、 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ を出力ベクトル、 $\Psi \in \mathbb{R}^{N \times N}$ をチャネル行列とする線形システムを考える。このとき同一の通信資源（RB）に割り当てられるユーザ数は全ユーザ数（ N ）に比べ極めて少ないため、図2(b)に示すように α は非零成分が少ない疎なベクトルとみなせる。



α : 送信信号強度
 p : 干渉成分の制約値
 Ψ : チャネル行列 ($N \times N$)
 Φ : 圧縮行列 ($K_q \times N$)
 K_q : x の非零要素数以上

(b) 圧縮センシングを適用した場合

図2 圧縮センシングに基づく電力割当・ユーザ割当方式（提案方式）の概略

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術 Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

全ユーザの受信信号ベクトルは式(1)と同様に次式にて与えられる。

$$\begin{bmatrix} y_1^{[b]} \\ y_2^{[b]} \\ \vdots \\ y_N^{[b]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^{[b]} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_2^{[b]} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_{N_U}^{[b]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha_1^{[b]} s_1^{[b]}} \\ \sqrt{\alpha_2^{[b]} s_2^{[b]}} \\ \vdots \\ \sqrt{\alpha_N^{[b]} s_N^{[b]}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & h_1^{[b]} & \dots & h_1^{[b]} \\ h_2^{[b]} & 0 & \dots & h_2^{[b]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_U}^{[b]} & h_{N_U}^{[b]} & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha_1^{[b]} s_1^{[b]}} \\ \sqrt{\alpha_2^{[b]} s_2^{[b]}} \\ \vdots \\ \sqrt{\alpha_N^{[b]} s_N^{[b]}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1^{[b]} \\ w_2^{[b]} \\ \vdots \\ w_N^{[b]} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

ここで、式(10)の右辺第一項、第二項、第三項はそれぞれ、各ユーザの所望信号、干渉信号、雑音を要素とするベクトルである。 $p_1^{[b]} = |s_1^{[b]}|^2$ 、 $\beta_i^{[b]} = |h_i^{[b]}|^2 p_1^{[b]}$ とおき、式(10)の第2項目の干渉信号ベクトルを電力領域に変換した干渉電力ベクトル $\mathbf{f}^{[b]} \in \mathbb{R}^{N_U \times 1}$ は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} F_1^{[b]} \\ F_2^{[b]} \\ \vdots \\ F_{N_U}^{[b]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \beta_1^{[b]} & \dots & \beta_1^{[b]} \\ \beta_2^{[b]} & 0 & \dots & \beta_2^{[b]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{N_U}^{[b]} & \beta_{N_U}^{[b]} & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1^{[b]} \\ \alpha_2^{[b]} \\ \vdots \\ \alpha_{N_U}^{[b]} \end{bmatrix} \equiv \Psi^{[b]} \boldsymbol{\alpha}^{[b]}. \quad (11)$$

ここで、 $\Psi^{[b]} \in \mathbb{R}^{N_U \times N_U}$ は辞書行列、 $\boldsymbol{\alpha}^{[b]} \in \mathbb{R}^{N_U \times 1}$ は b 番目の RB における電力割当係数ベクトルを表す。このとき、 b 番目の RB には 2 ユーザが割り当てられるため、 $\boldsymbol{\alpha}^{[b]}$ は非零成分を 2 つのみ有する疎なベクトルとなる。圧縮センシングにおける圧縮行列 $\Phi \in \mathbb{R}^{K_q \times N_U}$ を式(10)の両辺に乗算し次式を得る。

$$\Phi \mathbf{f}^{[b]} = \mathbf{A}^{[b]} \boldsymbol{\alpha}^{[b]}. \quad (12)$$

$$\mathbf{A}^{[b]} = \Phi \Psi^{[b]}. \quad (13)$$

ここで、 $\mathbf{A}^{[b]} \in \mathbb{R}^{K_q \times N_U}$ はセンシング行列である。また、 K_q/N_U は圧縮率であり、 $K_q \geq 2 \log_2(N_U)$ であれば適切な解を求めることができる[8]。最適化問題(7)-(9)は以下の l_1 ノルム最小化問題に緩和することができ、圧縮センシングの種々の解法を適用できる。

$$\arg \min_{\boldsymbol{\alpha}^{[b]}} \|\boldsymbol{\alpha}^{[b]}\|_1, \quad (13)$$

$$\text{subject to} \quad \|\hat{\mathbf{f}}^{[b]} - \mathbf{A}^{[b]} \boldsymbol{\alpha}^{[b]}\|_2 \leq \epsilon, \quad (14)$$

$$(9).$$

ここで、 $\hat{\mathbf{f}}^{[b]} = \Phi \mathbf{f}_{th}^{[b]} \in \mathbb{R}^{K_q \times 1}$ は b 番目の RB の観測ベクトル、 $\mathbf{f}_{th}^{[b]} \in \mathbb{R}^{N_U \times 1}$ は干渉閾値ベクトルである。上記の最適化問題において、(14)は干渉閾値（設計パラメータ）と実際のユーザ間干渉電力値の二乗平均誤差を最小化するための制約であり、 ϵ は許容できる最大誤差を表す。また、(14)は(8)および QoS 制約 $\sum_{b=1}^{N_{RB}} r_i^{[b]} \geq \gamma_{th}$ 、 $\forall i$ を同時に満たすように設計される。下り回線 NOMA システムでは、QoS 満たす最小の電力を遠方ユーザに割り当て、残りの電力を近傍ユーザに割り当てることで、QoS 制約を満たしながら伝送レートを最大化する。したがって、上記の最適化問題を解くことで、ユーザ間許容干渉量の制約の下で合計レートを最大化できる[5, 6]。

(13)-(15)を解くためには適切な干渉閾値ベクトル $\mathbf{f}_{th}^{[b]}$ を与える必要がある。ここで、干渉閾値ベクトルとは、ユーザ間干渉と雑音が存在する場合に与えられた QoS 制約 (r_{th}) を達成するためのユーザ間干渉の許容量であり、その導出を以下に示す。干渉閾値ベクトルを $\mathbf{f}_{th}^{[b]} = [F_{th, 1}^{[b]}, F_{th, 2}^{[b]}, \dots, F_{th, N_U}^{[b]}]^T \in \mathbb{R}^{N_U \times 1}$ と表す。ユーザ A (遠方ユーザ) の伝送レートは次式で表される。

$$r_A^{[b]} = \log_2 \left(1 + \frac{\beta_A^{[b]} (1 - \alpha_B^{[b]})}{\beta_A^{[b]} \alpha_B^{[b]} N} \right). \quad (16)$$

式(16)に $r_A^{[b]} = r_{th}$ を代入し、 $\alpha_B^{[b]}$ について解くと以下の式が得られる。

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術

Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

$$\alpha_B^{[b]} = \frac{1}{2^{r_{th}}} \left(1 - \frac{N}{\beta_A^{[b]}} \right). \quad (17)$$

(10)式において $\alpha_i^{[b]} = 0$ ($i \neq A, B$) と仮定すると、 $F_{th, A}^{[b]}$ は以下のように求まる。

$$F_{th, A}^{[b]} = \frac{\beta_i^{[b]}}{2^{r_{th}}} \left(1 - \frac{N}{\beta_i^{[b]}} \right), \forall i, \forall b. \quad (18)$$

ここで、ユーザ B (近傍ユーザ) の干渉成分は(7)を満たす限り完全に除去されるので、式(18)の $F_{th, A}^{[b]}$ をいかなる $F_{th, B}^{[b]}$ に置き換えた場合でも QoS 制約は満たされる。したがって、干渉閾値ベクトルは次式のように表される。

$$\mathbf{f}_{th}^{[b]} = \left[F_{th,1}^{[b]}, F_{th,2}^{[b]}, \dots, F_{th,N_U}^{[b]} \right]^T, \quad (19)$$

$$F_{th}^{[b]} = \frac{\beta_i^{[b]}}{2^{r_{th}}} \left(1 - \frac{N}{\beta_i^{[b]}} \right), \forall i, \forall b. \quad (20)$$

また、 b 番目の RB における観測ベクトル $\hat{\mathbf{f}}^{[b]} \in \mathbb{R}^{K_q \times 1}$ は次式で表される。

$$\hat{\mathbf{f}}^{[b]} = \Phi \mathbf{f}_{th}^{[b]}. \quad (21)$$

式(21)を最適化問題(13)-(15)に代入し、圧縮センシングに基づく解法を適用する。本稿では比較的簡易な解法として OMP (Orthogonal matching pursuit) 法^[10]を用いる。なお、RB 毎にチャネル応答が異なる場合、電力割当とユーザ選択に加えて RB 割当を最適化する必要がある。適応的な RB 割当手法として、本稿では遠方ユーザと近傍ユーザの RB 選択を 2 段階に分けて行う手法^[6]を用いる³。

3.3 計算量評価

本稿では演算量を RB あたりの乗算回数と定義する。ユーザ数を N_U としたとき、総当たり法の演算量は $\mathcal{O}(N_U!)$ となる。一方、OMP 法を用いる提案方式の演算量は RB あたり $\mathcal{O}(2K_q N_U)$ となる^[5, 6]。ここで、圧縮率を K_q/N_U とする。従来方式の一つである GOS (Global optimal search) 法^[3]は $\mathcal{O}(L^3 N_U C_2)$ の演算量を必要とする。この方式では L 個の離散的な電力レベルと N_U 人のユーザに対して、限られた候補の中から最適な組み合わせが選択される。 L が十分に大きいとき最適な結果に近い性能となる。UAA (User allocation algorithm) 法^[11]は C を電力割当に要する反復回数とすると $\mathcal{O}(CN_U^2)$ の演算量となる。JPCUC (Joint power control and user clustering) 法^[12]は RB 毎に $\mathcal{O}(N_U^3 N_{RB}^2)$ の演算量を要する。 $K_q \ll N_U$ であるとき圧縮センシングに基づく提案方式は所要演算量の低減に有効であることがわかる。

4. 特性評価

検討方式の有効性を示すため、シングルセルの下り回線 NOMA における平均ユーザレートを評価する。本シナリオでは、RB あたりのユーザ数を 2、RB 数を $N_U/2$ とする。また、 $N_U = 50$ 、セル半径は 500m とし、ユーザは 1 次元セル内の $1 \leq d \leq 500$ の範囲に(a)シナリオ 1: 一様分布 ($p_1(d) = \text{一定}$)、(b)シナリオ 2: 単調増加 ($p_2(d) = d$)、(c)シナリオ 3: 単調減少 ($p_3(d) = 500 - d$)していると仮定する。図 3 は 2 次元平面上でのユーザ分布を示したものであり、シナリオ 2 は 2 次元セル内の一様分布と等価である。ここで、 d_i は基地局からユーザ i までの距離を表し、単位はメートル(m)である。ユーザ i のチャネル応答は $h_i^{[b]} = x_i / \sqrt{4\pi d_i^2}$ と与えられる。 x_i は実部と虚部が平均 0 の独立なガウス分布に従う確率変数である。本節では、送信信号電力対雑音電力比を送信 SNR、受信信号電力対干渉および雑音電力比を受信 SINR と定義し、受信 SINR の所望値 (QoS 制約) を γ_{th} とする。ここで、QoS 制約は $\gamma_{th} = 10, 12\text{dB}$ とする。また、 $K_q = 2 \log_2(N_U)$ とする。また、比較として、OMA システム、CSS-PA^[4]、および

³ RB 割当手法の詳細は[6]に記載されている。

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術 Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

ランダム選択を用いた NOMA の平均ユーザレートを評価する。CSS-PA ではチャネル係数を元に全ユーザをソートし、 k 番目のユーザと $k + N_U/2$ 番目のユーザを選択する。ランダム選択では、候補となるユーザの中からランダムに選択する。OMA では、1 つの RB の総周波数帯域 W を $\alpha_A^{[b]}W$ と $\alpha_B^{[b]}W$ に分割し、2 ユーザに割り当てる。比較方式では電力割当として FTPC^[13] を適用する⁴。

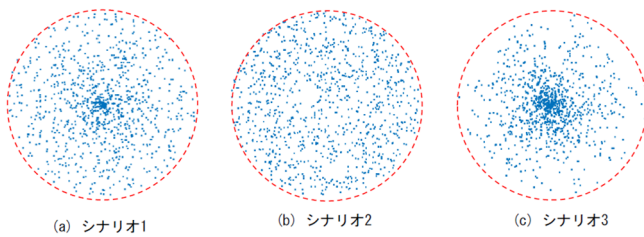
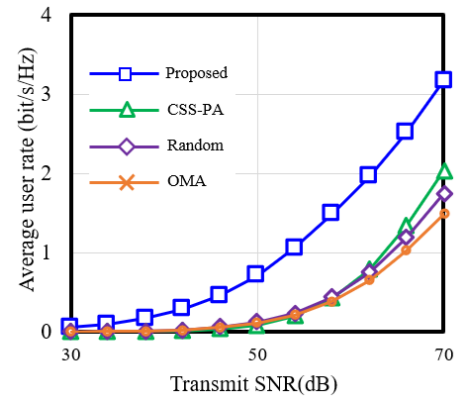


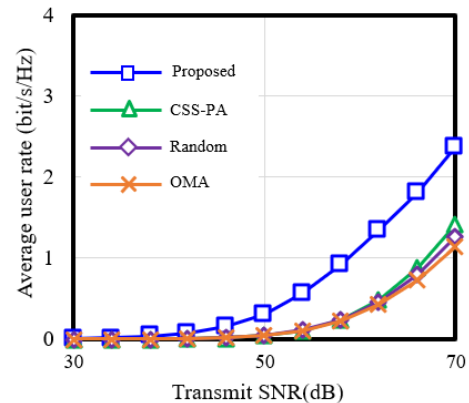
図 3：セル内のユーザ分布

図 4(a)-(c)は、提案方式を用いた NOMA システムの $\gamma_{th} = 10, 12\text{dB}$ のときの、送信 SNR に対する平均ユーザレートを示す。この結果から、提案方式はいずれのシナリオ（ユーザ分布）においても比較方式（CSS-PA、ランダム割当、OMA）に比べて高い平均ユーザレートを達成できることがわかる。

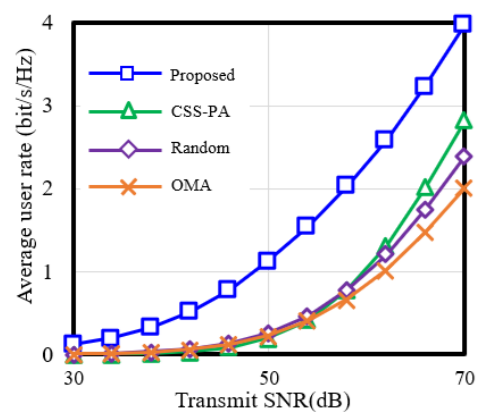
提案方式の有効性を QoS 制約の観点から評価する。シナリオ 1 において提案方式を用いた場合の SNR=50dB と 100dB のときの遠方ユーザの SINR 分布を図 5(a) (b)にそれぞれ示す。提案方式における遠方ユーザの SINR はあらかじめ設定された γ_{th} の周辺に分布していることが図 5 より確認できる。これは与えられた QoS の要求値が実現可能である限り、所望のサービス品質（QoS）を高い水準で保証できることを表している。



(a) シナリオ 1



(b) シナリオ 2

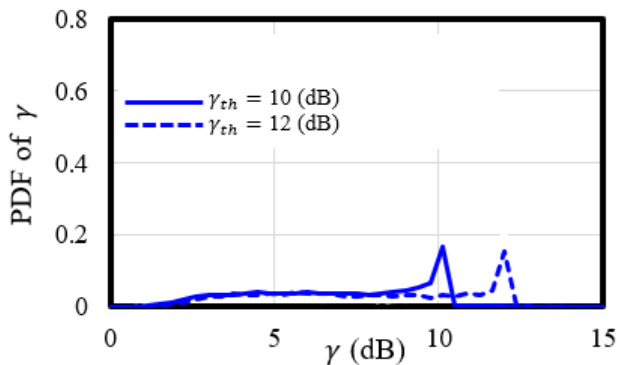


(c) シナリオ 3

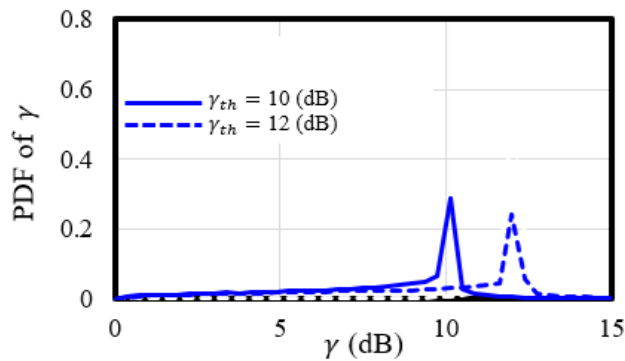
図 4 各シナリオにおける平均ユーザレート特性

⁴ [11] の式 (6) における公平性パラメータ $\alpha_{FTPC} = 0$ (公平性を最大とする電力割当を行う) を用いる。

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術 Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access



(a) 送信 SNR=50dB



(b) 送信 SNR=100dB

図 5：検討方式における遠方ユーザの SINR の経験確率密度

5. 2 層異種無線網への適用

提案方式におけるユーザ選択・電力割当の考えは、セルラー通信（マルチセルシステム）における周波数・電力割当問題へも適用可能である。セルラーシステムにおいて、サービスエリアの広い基地局（マクロセル：MC）の配下に狭小基地局（スモールセル：SC）を混在させた通信形態は一般的に異種無線網（Heterogeneous networks）と呼ばれる。異種無線網では各基地局への電力・周波数リソースの割当を最適化することで、セル間干渉を軽減できる。しかしながら、SC 数の増加に伴い最適化に要する演算量も膨大となる。

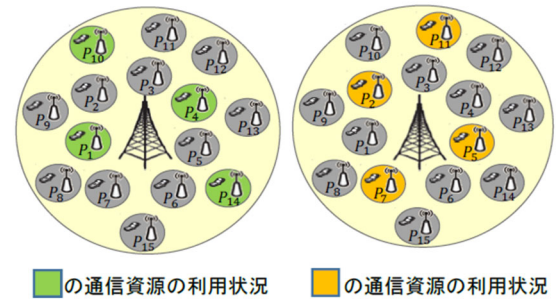


図 9：二層異種無線網における通信資源の利用状況の例（ $P_1 \sim P_{15}$ は通信資源を表す）

図 9 に二層異種無線網における通信資源の利用状況の例を示す。 $P_1 \sim P_{15}$ は各基地局に割り当てられた通信資源を表す。SC 間の干渉を低減しながら周波数利用率を高めるため、同一周波数を距離的に離れた基地局で再利用するものと仮定する。図 9 に示すように、ある周波数資源が割り当てられた無線基地局は全体の一部であり、その通信資源の利用状況は疎とみなすことができる。したがって、異種無線網の周波数・電力割当の最適化問題の解法として 3 節における圧縮センシングを用いた提案方式を適用できる。提案方式を用いる場合、総当たり法に匹敵する合計伝送速度を達成しながら、最適化に要する演算量を大幅に低減できることを明らかにしている^[7]。本検討の詳細は[7]において報告している。

6. まとめと今後の展望

本稿では、下り回線 NOMA におけるサービス品質 (QoS) 制約を考慮した圧縮センシングに基づく低演算量ユーザ選択・電力割当方式を提案した。提案方式は、所要の SINR に基づき許容可能なユーザ間の干渉閾値を求め、それを満たす条件下で総ユーザレートを最大にするユーザ選択と電力割当を求めるものである。シングルセル下り回線 NOMA において提案方式を適用した場合の演算量と平均ユーザレートを評価した。その結果、提案方式は要求される QoS が実現可能なものである限り、QoS 制約をほぼ満たしながら、その他の手法と比較して良好な伝送速度を達成できることを示した。さ

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術

Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

らに、提案方式の考えはマルチセルシステム（異種無線網）における他セル干渉下での基地局の周波数・電力割当問題にも拡張可能であることを述べた。

ところで、セルラーシステムにおいて基地局のアンテナ素子数がシステム全体のユーザ数に比べて十分に多い場合、自セルのユーザの通信品質を維持しながら、他セルへの与干渉を効果的に抑圧できる^[14]。他方、基地局アンテナ素子数が比較的少ない場合、提案方式を用いることでスモールセル基地局のアンテナ素子数が少ない場合においても層間干渉を効果的に抑圧することができる^[7]。本研究の成果はアンテナ多素子化による空間信号処理との親和性も高いため、多素子アンテナや分散アンテナを用いるシステムに適した手法について今後検討したい。

参考文献

- [1] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, L. Anxin, and K. Higuchi, “Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access,” Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring, June 2013.
- [2] K. Higuchi, A. Benjebbour, “Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E98.B, Issue 3, pp.403414, March 2015.
- [3] K. Long, P. Wang, W. Li, D. Chen, “Spectrum Resource and Power Allocation with Adaptive Proportion Fair User Pairing for NOMA System,” IEEE Access, vol.7, pp.80043-80057, June 2019.
- [4] H. Zhang, D. K. Zhang, W. X. Meng, and C. Li, “User pairing algorithm with SIC in non-orthogonal multiple access system,” Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), pp.1-6, May. 2016.
- [5] A. Nasser, O. Muta, M. Elsabrouty, and H. Gacanin, “Joint User Pairing and Power Allocation with Compressive Sensing in NOMA Systems,” IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 10, No. 1, Jan. 2021.
- [6] T. Makita, and O. Muta, “Compressed Sensing based Power Allocation and User Selection with Adaptive Resource Block Selection for Downlink NOMA Systems,” IEICE Transactions on Communications, Vol.E105-B, No.8, pp.959-968, Aug. 2022.
- [7] A. Nasser, O. Muta, M. Elsabrouty, and H. Gacanin, “Compressive Sensing Based Spectrum Allocation and Power Control for NOMA HetNets,” IEEE Access, pp.98495-98506, July 2019.
- [8] E. J. Candès and M. B. Wakin, “An introduction to compressive sampling,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 25, no. 2, pp. 21–30, March. 2008.
- [9] Z. Yang, W. Xu, C. Pan, and M. Chen, “On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints,” IEEE Communications Letters, vol.21, no. 7, pp.1649-1652, March 2017.
- [10] M. F. Duarte, Y. C. Eldar, “Structured Compressed Sensing: From Theory to Applications,” IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 59, No. 9, pp.4053-4085, July. 2011.
- [11] S. Zhang, N. Zhang, G. Kang, and Z. Liu, “Energy and spectrum efficient power allocation with NOMA in downlink HetNets,” Physical Communication, vol. 31, pp. 121–132, Dec. 2018.
- [12] Z. Yang, C. Pan, W. Xu, and M. Chen, “Compressive sensing-based user clustering for downlink NOMA systems with decoding power,” IEEE Signal Processing Letters, vol. 25, no. 5, pp. 660–664, March. 2018.
- [13] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Nakamura, “System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA),” Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013.
- [14] A. Nasser, O. Muta, M. Elsabrouty, and H. Gacanin, “Interference Mitigation and Power Allocation Scheme for Downlink MIMO-NOMA

下り回線非直交多元接続における圧縮センシングに基づくリソース割当・干渉制御技術 Resource Allocation and Interference Coordination Techniques Based on Compressed Sensing for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

HetNet,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 68, Issue 7, pp.6805-6816, July 2019.

この研究は、令和元年度S C A T研究助成の対象として採用され、令和2～4年度に実施されたものです。