



## 非直交多元接続 (NOMA)

樋口健一 (東京理科大学)

higuchik@rs.tus.ac.jp

### 1. 非直交多元接続 (NOMA) とは

移動通信システムにおいて、基地局に接続された複数のユーザ端末の各々に対してシステムが用意する無線リソースを分割して割り当てることにより同時通信を実現する仕組みを多元接続という。代表的な多元接続に、周波数分割多元接続 (FDMA : Frequency Division Multiple Access), 時間分割多元接続 (TDMA : Time Division Multiple Access), 及び符号分割多元接続 (CDMA : Code Division Multiple Access) がある (図1)。第3世代移動通信システム (3G) では CDMA が, 4G LTE/LTE-Advanced と 5G NR では FDMA と TDMA の組合せが主に用いられている。

FDMA と TDMA は, 複数ユーザの信号が異なる周波数ないし時間を使って伝送されるため, ユーザ間の干渉が生じない直交多元接続 (OMA : Orthogonal Multiple Access) に分類される。一方 CDMA は, 複数ユーザの信号を同一の周波数・時間を使って伝送するためユーザ間干渉が生じるので, 非直交多元接続 (NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access) に分類される。NOMA は, OMA に比較してユーザ間干渉が生じる欠点があるが, 1 ユーザ当りの割当帯域幅ないし時間スロット数を増大できる利点がある。3G で用いられた CDMA では「符号」としてユーザ間干渉を拡散率分の1に抑圧する比較的簡易な拡散符号が用いられていた。近年, 従来の CDMA よりもユーザ間干渉抑圧能力の高い「符号」とそれを用いた送受信機構成を特徴とする NOMA の検討が盛んになっている。

### 2. NOMA の基本原理と特性

基地局送信・ユーザ端末受信の下りリンクを例に取り, 重畳符号化とシリアル干渉キャンセラ (SIC : Successive Interference Canceller) を用いた NOMA の原理と特性について OMA (FDMA を例に取るが TDMA でも同様である) と

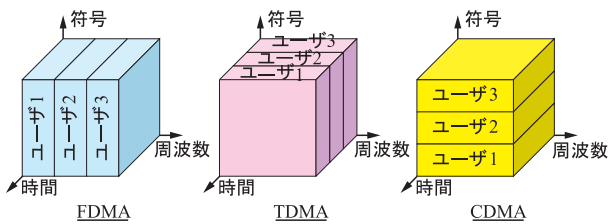


図1 代表的な多元接続

比較しながら解説する<sup>(1)</sup>。説明の簡単のため, 2 ユーザ環境を想定し, 基地局, ユーザ端末のアンテナ数は共に1とする。全体のシステム帯域幅を1 Hz とする。図2に NOMA と OMA の周波数スペクトルの用い方の違いを示す。

NOMA では, 各ユーザ宛の情報ビット列は独立にターボ符号や LDPC (Low Density Parity Check) 符号のようなシャノン限界に漸近する強力な誤り訂正符号化を用いて符号化・変調されシステム帯域幅の送信信号が生成される。本 NOMA の従来の CDMA との違いは, 符号化利得の小さい拡散符号は用いずに強力な誤り訂正符号化のみで帯域拡散を行うことである。

基地局は, ユーザ  $i (i=1, 2)$  宛の符号化シンボル  $s_i (E[|s_i|^2]=1)$  を電力  $p_i$  で送信する。  $p_i$  の和は基地局の許容最大送信電力  $p_{total}$  で制限される。NOMA では,  $s_1$  と  $s_2$  は次式のように重畳符号化に基づいて同一帯域に多重される。

$$x = \sqrt{p_1}s_1 + \sqrt{p_2}s_2 \quad (1)$$

ユーザ  $i$  の受信信号は,

$$y_i = h_i x + w_i = h_i \sqrt{p_1}s_1 + h_i \sqrt{p_2}s_2 + w_i \quad (2)$$

と表される。ここで,  $h_i$  はユーザ  $i$  と基地局間の複素チャネル係数であり,  $w_i$  は電力スペクトル密度が  $N_{0,i}$  のユーザ  $i$  が観測する雑音成分 (セル間干渉を含む) である。

下りリンク NOMA では, 重畳符号化されたユーザ間干渉を除去する SIC 処理がユーザ端末受信機に実装される。SIC では, 各ユーザ宛の信号を雑音で正規化されたチャネル利得  $|h_i|^2/N_{0,i}$  が小さい順に復号する (図3)。このときポイントとなるのは, 各ユーザ宛信号が宛先ユーザ端末で正しく復号

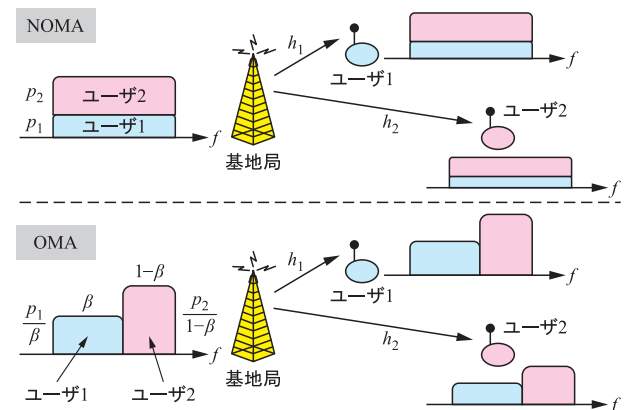


図2 NOMA と OMA の周波数スペクトル使用法の違い

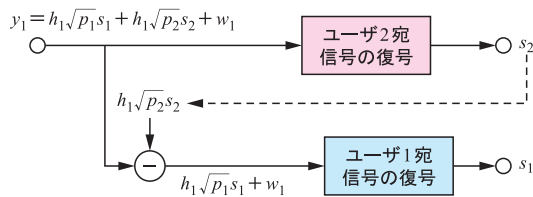


図3 SIC処理

できるよう適切に送信レート制御されていれば、各ユーザは自身より復号順序が先の全ての他ユーザ宛信号を必ず正しく復号し、復号結果を活用して受信信号から干渉成分を除去できることにある。\$|h\_1|^2/N\_{0,1} > |h\_2|^2/N\_{0,2}\$ となる2ユーザNOMAの場合、ユーザ2は復号順序が最初のため干渉キャンセル処理は行わず、\$s\_1\$ による干渉の下 \$y\_2\$ から \$s\_2\$ を直接復号する。一方、ユーザ1はまず始めに \$y\_1\$ から \$s\_2\$ を復号し、再生された \$s\_2\$ を基に受信信号 \$y\_1\$ から \$s\_2\$ による干渉成分 \$h\_1\sqrt{p\_2}s\_2\$ を減算する。その後、\$y\_1 - h\_1\sqrt{p\_2}s\_2 = h\_1\sqrt{p\_1}s\_1 + w\_1\$ を用いて \$s\_2\$ による干渉の影響なしに自身宛の信号 \$s\_1\$ を復号する。したがって、ユーザ \$i\$ のスループット \$R\_i\$ は次式で表される。

$$\begin{cases} R_1 = \log_2(1 + p_1|h_1|^2/N_{0,1}) \\ R_2 = \log_2(1 + p_2|h_2|^2/(p_1|h_2|^2 + N_{0,2})) \end{cases} \quad (3)$$

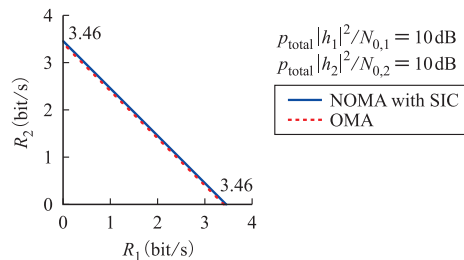
\$R\_2\$ の右辺に現れる \$p\_1|h\_2|^2\$ は \$s\_1\$ からの干渉電力である。一方、SIC処理によって \$R\_1\$ には \$s\_2\$ からの干渉電力が現れない。

これに対してOMAでは、図2のようにユーザ1に帯域幅 \$\beta\$ (\$0 \le \beta \le 1\$) Hz を、残りの \$1 - \beta\$ Hz をユーザ2に割り当てたとき、\$R\_i\$ は次式のようになる。

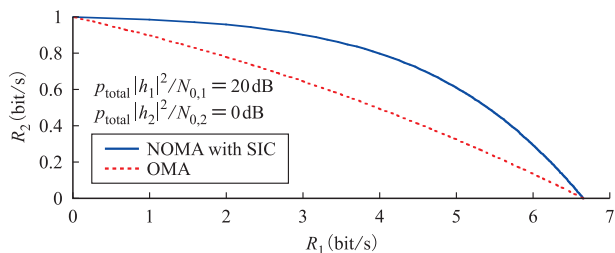
$$\begin{cases} R_1 = \beta \log_2(1 + p_1|h_1|^2/\beta N_{0,1}) \\ R_2 = (1 - \beta) \log_2(1 + p_2|h_2|^2/(1 - \beta)N_{0,2}) \end{cases} \quad (4)$$

OMAの場合、\$R\_1, R\_2\$ にはユーザ間干渉電力による劣化は生じないものの、伝送帯域幅がシステム帯域幅 (1 Hz) より小さくなってしまふ影響がある。

図4に対称チャネル及び非対称チャネルの場合の各ユーザへの割り当りリソース (\$p\_1, p\_2\$, 及び \$\beta\$) を変化させたときに実現される \$R\_1\$ と \$R\_2\$ の組合せを図示した容量 (スループット) 領域を示す。対称チャネルでは、\$p\_{\text{total}}|h\_i|^2/N\_{0,i}\$ で定義した2ユーザの信号対雑音比 (SNR : Signal-to-Noise Ratio) は同一の 10 dB とした。非対称チャネルでは、ユーザ1のSNRは 20 dB、ユーザ2のSNRは 0 dB とした。対称チャネルでは、NOMAとOMAのスループット領域は同一である。しかし非対称チャネルでは、NOMAのスループット領域はOMAを包含してより大きなものとなっている。合計スループット \$R\_1 + R\_2\$ を最大化するには多元接続によらずユーザ1に全てのリソースを割り当てればよいが、ユーザ間の公平性を高めるために \$R\_2\$ を増大するとき、NOMAはOMAよりも \$R\_1\$ の減少を抑えられる。例えば \$R\_2\$ を 0.8 bit/s にしたい場合、NOMAはOMAに比較して \$R\_1\$ を2倍程度増大できる。これは、チャネル状態の良いユーザ1は帯域制限の状態にあるにもかかわらずOMAでは \$R\_2\$ を増大するためにユーザ1の割り当り帯域を減少させる必要があるのに対し、NOMAではユーザ1への割り当り帯域を減少させることなくユーザ2への電力割り当りを増大するだけで \$R\_1\$ の減少を抑えつつ \$R\_2\$ を大きく改善できるためである。(ユーザ1はSICでユーザ2か



(a) 対称チャネルの場合



(b) 非対称チャネルの場合

図4 NOMAとOMAのスループットの比較

らの干渉を除去できるのでユーザ2に大電力を割り当てても干渉の問題は生じない。)

移动通信システムでは一般に遠近問題によりセル内のユーザ間でチャネル状態が大きく異なる非対称チャネルとなる。また、上記の議論で前提としていた動的な各ユーザへの帯域と電力の割り当り、及びその割り当りに応じた送信レートの動的制御は、パケット交換に特化した4G LTE以降の移动通信システムにおいて前提となる機能である。つまり、ここで述べたNOMAは、パケット交換に特化した移动通信システムにおいて、より品質の高いサービスを提供するために周波数利用率 (\$R\_1 + R\_2\$) に加えてセル端ユーザのスループットを改善してユーザ間の公平性を改善しようとした場合に、OMAに比較して優れた特性を有する。ここでは下りリンクについて述べたが、上りリンクについても同様の結論が導かれる<sup>(1)</sup>。

### 3. NOMAの研究動向と実システムへの適用例

誤り訂正符号化から複素変調・リソースマッピングまでを包含した「符号」をどのように構成するかを検討はNOMAの主要な研究分野<sup>(2), (3)</sup>の一つであり、SCMA (Sparse Code Multiple Access) 等が例に挙げられる。このような検討は、干渉除去・抑圧に必要な演算量の観点、及びチャネル状態に応じたリソース割り当りや送信レート制御にある程度の誤差が生じる現実的なシナリオの観点で特に意味を持ち、極端な例としては上記制御が行われないグラントフリーNOMAの検討がある。また、MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)、基地局間連携、リレー伝送、IRS (Intelligent Reflecting Surface) を用いた通信等におけるNOMAの検討も盛んである。いずれにおいても無線リソース割り当り送信レート制御が重要となる。

実システムについては、ビーム内重畳符号化を用いた下りリンクNOMA<sup>(1)</sup>がMUST (MultiUser Superposition Transmission) の名称で4G LTE/LTE-Advanced標準仕様に採用されている<sup>(4)</sup>。5G以降の移动通信システムへの導入は今後の検討課題である。

文 献

- (1) K. Higuchi and A. Benjebbour, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 3, pp. 403-414, March 2015.
- (2) L. Dai, et al., "A survey of non-orthogonal multiple access for 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, thirdquarter 2018.
- (3) Y. Liu, et al., "Evolution of NOMA toward next generation multiple access (NGMA) for 6G," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 4, pp. 1037-1071, April 2022.
- (4) 3GPP TR36.859, "Study on downlink multiuser superposition transmission (MUST) for LTE (Release 13)," Dec. 2015.

(2024年2月20日受付)

