7A-02

mMTCにおけるグラントフリー非直交多元接続方式のための自己組織的電力制御アルゴリズムの性能評価

平井　健士†　　小田　怜‡　　若宮　直紀††

大阪大学情報科学研究科†, ††　　大阪大学基礎工学部‡

1. 序論

第 5 世代移動通信システム(5G)における massive Machine-Type Communications (mMTC)の上り通信のために、グラントフリー電力軸非直交多元接続(Grant-Free Power-domain Non-Orthogonal Multiple Access: GF-NOMA) [1][2]が検討されている。GF-NOMA では、センサ等の端末が自律分散的に、時間–周波数で区切られたスロットを選択するとともに、目標受信電力を選択する。各端末は、この選択した目標受信電力と、自身–BS 間のチャネルゲイン(以下、単にチャネルゲイン)に基づいて、送信電力を決める。この電力制御により、BS 側で逐次干渉除去(Successive Interference Cancellation: SIC)が効果的に働くため、スループットの向上が見込まれる。ただし、GF-NOMA は電力軸を利用するため、パケット送信にかかる消費電力が増大してしまう。消費電力を抑えるためには、チャネルゲインが小さい端末ほど、小さい目標受信電力を選択することが要求される。

GF-NOMA の消費電力を抑えるために、自身のチャネルゲインに応じて電力選択の優先度に偏りを持たせたチャネルベース自己組織的電力選択が提案されている[3]。この手法は、自律分散制御の制約から、各端末が自身のチャネルゲインのみ既知であるという条件下で、要求された電力選択パターンを創発できる。

しかしながら、この手法[3]は、端末密度に偏りがあるような環境では、電力選択の優先度の偏りによるパターン形成の効果が制限され、消費電力を十分に低減できない恐れがある。そこで、本研究では、端末密度に偏りがある端末分布において、提案手法の消費電力低減効果を分析・評価する。

2. システムモデル

本研究で対象とする GF-NOMA システムは、1 台の BS とN台の BS につながる端末から構成される。GF-NOMA では、各端末は、自身のバッファにランダム到着するパケットを送信するために、ALOHA ベースの MAC プロトコルを利用する。具体的には、パケットが到着したサブフレーム(時刻)において、ランダムに選択したサブチャネル(周波数帯域)を利用して、パケットを送信する。

各端末は、ある規範に基づいて、L種類の電力レベルの中から 1 つ選択し、その電力レベルlで規定された目標受信電力p_lとなるような送信電力でパケットを送信する。この目標受信電力は、$p_1 > p_2 > \cdots > p_L$となるように設計されている。また、この電力は、たかだか 1 台の端末が各レベルを利用しても SIC による復調がうまくいくように設計されている。チャネルゲインg_kとなる端末kは、推定したチャネルゲイン$\tilde{g}_k$を用いて、自身の送信電力P_kを$P_k = p_l/\tilde{g}_k$で計算する。そのため、チャネルゲインが小さい端末ほど、送信電力は大きくなる。

Performance Evaluation of Distributed Power Control for Grant-Free Non-Orthogonal Multiple Access in mMTC
† Takeshi Hirai, Graduate School of Information and Science Technology, Osaka University
‡ Rei Oda, School of Engineering Science, Osaka University
†† Naoki Wakamiya, Graduate School of Information and Science Technology, Osaka University

3. チャネルベース自己組織的電力選択

提案しているチャネルベース自己組織的電力選択手法[3]では、各端末が、チャネルゲイン情報等の制御情報を交換せずに、レベル利用率を均等化しつつ、要求されたチャネルゲインに基づく電力選択パターンを創発することを目指す。まず、レベル利用率の均等化によって、高スループットを確保できる。そのために、過去のレベル利用率をセンシングし、利用率の低いレベルを利用するような仕組みが必要になる。また、チャネルゲインに依存した電力選択によって低消費電力を実現できる。そのために、同じレベルを利用しようとしている端末の中で、チャネルゲインの大きい端末ほど、小さい電力レベルを優先的に利用する仕組みが必要になる。

文献[3]では、上記の仕組みを、電力レベル上を移動するエージェントが自身に適した電力レベルを探索するアルゴリズムとしてモデル化している。レベルの状態を示す連続値の変数を導入し、これを逐次更新することで、上記の優先度の時間的増減を表現している。時刻tでのある端末の状態変数x_tは、移動値αを用いて、以下の式 (1)で更新する。ただし、$1 \le x_t < L$である。

$$x_t = x_{t-1} + \alpha \tag{1}$$

この状態変数を使って、電力レベルl_tは、以下の式 (2)で更新する。

$$l_t = \lfloor x_t \rfloor \tag{2}$$

移動値αは、上記のアプローチを反映し、レベル移動方向とレベル移動量によって規定する。本稿では、基礎的な制御手法であるため、レベル移動方向を、近傍のレベルの集合$\mathcal{W} = \{l_{t-1} - 1, l_{t-1}, l_{t-1} + 1\}$の中で最も利用率の低いレベルに向かう方向として規定する。すなわち、以下の式 (3)のように規定する。

$$m_t = \underset{l \in \mathcal{W}}{\operatorname{argmin}}(u_l) - l_{t-1} \tag{3}$$

u_lは、レベルlの利用率を示しており、上り参照信号(互いに直交し、SIC を利用するために端末から BS に送信される制御信号)等から推定可能である。

また、レベル移動量は、優先度合いを反映するために、チャネルゲインが小さいほど、正方向への移動量を大きく、負方向への移動量を小さくする。本稿では、反応閾値モデルから着想を得て、dB 表記のチャネルゲインg_kに対する式 (4)の移動量関数で規定する。ここで、βは 1 ステップ当たりの最大移動量、θは反応閾値である。

このチャネルベース自己組織的電力選択手法は、端末密度の偏りによって、以下のような消費電力特性が見ら

Copyright ©2022 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

れる。まず、密度偏りが大きいほど、端末間の移動量の差も小さくなるため、消費電力低減効果が小さくなる。ただし、そもそも、近いチャネルゲインとなる端末が増加するため、電力選択による消費電力低減の効果自体が小さくなる。また、移動量関数の傾きの小さい区間に端末密度の偏りが生じているほど、端末間の移動量の差が小さくなるため、消費電力低減効果が小さくなる。

$$f(m_t, g_k) = \begin{cases} -\beta\left(1 - \dfrac{g_k^2}{g_k^2 + \theta^2}\right) & m_t < 0 \\ 0 & m_t = 0 \\ \beta\,\dfrac{g_k^2}{g_k^2 + \theta^2} & m_t > 0 \end{cases} \qquad (4)$$

4. 密度偏りがある端末分布での消費電力特性

本稿では、端末密度の偏りをモデル化した端末分布において、2章のGF-NOMAモデルの下で、チャネルベース自己組織的電力選択手法の消費電力特性を評価した。BSを座標(0,0)に配置し、その周辺に端末を3000台配置した。端末密度の偏りをモデル化するために、これらの端末の座標(x, y)を、平均(μ_x, μ_y)、分散σ^2で互いに独立な2変数による2次元正規分布に従って配置した。つまり、座標(x, y)における端末の存在確率$s(x, y)$は、以下の式(5)で示される。$\mu_x = 0, \mu_y = 0, \sigma = 200$の例を図1に示す。

$$s(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma^2}} \qquad (5)$$

パラメータの多くは文献[3]と同様とした。ただし、基本的な特性を調査するために、各端末はパケットを再送しないものとした。初期電力レベルはLとし、式(4)の$\beta = 0.01$及び$\theta = -108$ dBとなる関数を利用した。図2は、端末-BS間距離に対する距離減衰を踏まえた移動量関数値(見やすさのためβで割った値)を示している。端末-BS間距離が大きくなると、傾きが小さくなっている。

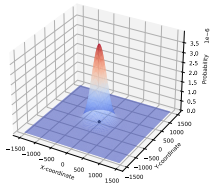


図 1 – 密度偏りのある分布例 $(\mu_x = 0, \mu_y = 0, \sigma = 200)$

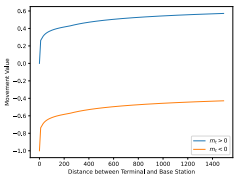


図 2 – 端末-BS 間距離に対する移動量関数値(βで割った値)

本評価では、平均μ_x及び標準偏差σを変動させたときの消費電力特性を調査した。平均μ_xを変動させることで、端末密度の偏りの中心位置を変動させる。また、σを変動させることで、偏り度合いを変動させる。このモデルにおいて、ランダム電力選択 (ランダムに電力レベルを選択)とBS補助型電力選択 (チャネルゲインに対する理想的な電力レベル選択が可能)の2つの手法に対するチャネルベース自己組織的電力選択の特性を調査した。

図3は、端末密度の偏り度合いに対する消費電力特性を示している。横軸はσで、縦軸は1パケット当たりの平均消費電力である。まず、全体の傾向として、3章で議論した通り、密度の偏りが大きくなるほど、消費電力差は小さくなっている。一例として、図1に示す$\sigma = 200$のような密度偏りがある配置であっても、チャネルベース自己組織的電力選択手法は、ランダム選択手法より16.6 dBも消費電力を抑えることができた。また、端末密度の偏りが大きくなるほど、チャネルベース自己組織的電力選択手法とBS補助型電力選択の消費電力差は大きくなっているが、$\sigma = 25$の場合であっても、その差をたかだか2.6 dB程度に抑えることができていた。

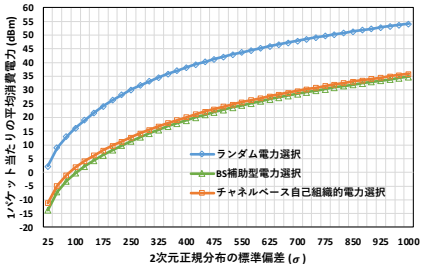


図 3 – 2次元正規分布の標準偏差に対する消費電力の特性

図4は、端末密度の偏りの中心位置に対する消費電力特性を示している。横軸はμ_xの値を示しており、縦軸は1パケット当たりの平均消費電力を示している。ここでは、$\sigma = 200$の結果を示す。図2の特徴から、μ_xが大きくなる(移動量関数の傾きが小さくなる部分を利用する端末が増加する)と、BS補助型電力選択との消費電力差がわずかに上昇した。ただし、その差は、$\mu_x = 1000$であっても2 dB程度であった。また、移動量関数の傾きが小さいような$\mu_x = 1000$においても、チャネルベース自己組織的電力選択手法は、ランダム電力選択より12.6 dBも消費電力を抑えることができた。

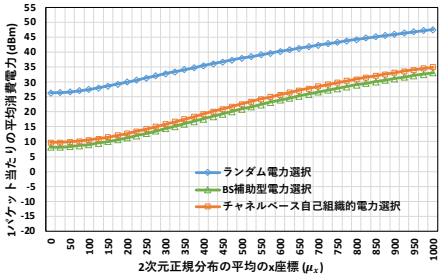


図 4 – 2次元正規分布の平均の座標に対する消費電力の特性

5. 結論

本稿では、GF-NOMAのためのチャネルベース自己組織的電力制御手法において、端末の配置密度に偏りがある環境であっても、消費電力を十分低減させることが可能であり、ランダム電力選択より16.6 dBも消費電力を抑えることが明らかになった。

謝 辞

本研究の一部は、日立財団倉田奨励金(No. 1401)及び日本学術振興会科研費(JP20J13436)の補助を受けている。

文 献

[1] H. Jiang, Q. Cui, Y. Gu, X. Qin, X. Zhang, and X. Tao, "Distributed layered grant-free non-orthogonal multiple access for massive MTC," 2018 IEEE PIMRC, pp. 1–7, 2018.

[2] J. Choi, "NOMA-based random access with multichannel ALOHA," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 12, pp. 2736–2743, 2017.

[3] 小田怜, 平井健士, 若宮直紀, "mMTCにおけるグラントフリー電力軸非直交多元接続方式の消費電力低減のための自律分散電力制御の提案," 信学技報, vol. 121, no. 301, NS2021-102, pp. 29-34, 2021年.

Copyright ©2022 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.