

氏名 (本籍)	ながた けいすけ 永 田 啓 介 (広島県)
学位の種類	博士 (情報工学)
学位記番号	甲第 95 号
学位授与年月日	平成 24 年 3 月 23 日
学位授与の要件	広島市立大学大学院学則第 35 条第 2 項及び学位規程第 3 条第 2 項の規定による
学位論文題目	非同期符号分割多重通信における遅延ロックループ回路の確率論的解析
論文審査委員	主 査 教 授 生 岩 量 久 副 査 教 授 吉 田 彰 顕 副 査 准教授 藤 坂 尚 登

論文内容の要旨

第三世代携帯電話の通信方式としても使われている符号分割多重通信(CDMA:Code Division Multiple Access)は各ユーザに直交符号を割り当て、各ユーザの情報を同一周波数帯域、同一時刻上に混在させ多重化を行う方式である。CDMA 通信の大きな問題の一つとして多重接続干渉(MAI:Multiple Access Interference)がある。MAI とは CDMA 通信における所望ユーザの信号に対する他ユーザの信号である。全ユーザの送信タイミングを揃える同期 CDMA では、各ユーザの符号間の相互相関関数が完全にゼロとなる直交符号を設計することにより、MAI の影響をゼロにできる。各ユーザの送信タイミングが異なる非同期 CDMA では、各ユーザの符号間の相互相関関数が小さくなる M(Maximal-length)系列や Gold 系列などを採用して、MAI の低減を図っている。最近、非同期 CDMA において、マルコフ性を有し 2 値の間を遷移する系列、いわゆるマルコフ符号を拡散符号に用いると MAI の影響が低減できることが報告された。つまり拡散符号としてマルコフ符号を採用することにより従来符号に比べ信号品質の向上と多重化数増大が望める。一方で、スペクトル分布が一様でない、自己相関関数がデルタ関数的でないことなど、マルコフ符号固有の性質が信号成分電力低下、同期捕捉劣化などを招くのではないかと懸念されている。これらの懸念は、伝送路帯域、チップパルス波形などを見直すことにより払拭されつつあり、マルコフ符号を採用した CDMA システムが従来符号を用いたシステムに優るよう最適化されるであろうと期待されている。

CDMA 受信部では、受信信号を拡散している符号に同期した同一の符号を受信信号に乗算する逆拡散操作により信号を復号する。遅延ロックループ(DLL:Delay-Locked Loop)はこの逆拡散操作において符号間の同期を維持させる回路である。DLL が制御する符号間の同期には位相誤差と呼ばれる誤差が生じる。これは信号品質に直接影響するため無視することはできないが、

拡散符号のマルコフ性にどのように依存するか解析はこれまで行われていない。同期現象は非線形現象の一つであり、DLL の厳密な解析は困難である。DLL の位相検出部の特性を位相誤差に対して線形化し、また他ユーザの信号である MAI と受信部で生成する局部拡散符号との積を白色ガウス雑音(WGN:White Gaussian Noise) とみなせば DLL は比較的簡単な確率微分方程式で近似できる。この解析は線形解析と呼ばれる。M 系列や Gold 系列などの i.i.d. (independent and identically distributed) 系列とみなせる拡散符号を用いた CDMA 通信において、DLL は上述のように解析されてきたが、少数ユーザ時の MAI の影響は WGN で近似することが難しく、解析結果と数値シミュレーション結果に大きな誤差が生じることが示されている。加えて拡散符号にマルコフ符号を採用した場合、このような符号のスペクトルは一樣ではなく、自己相関が消えないためマルチパス信号が加わっても MAI の強度分布は中心極限定理が保証するガウス分布に近づき難く、解析がさらに困難となる。本研究では、マルコフ符号が印加された DLL の二つの解析法を提案する。

1. 他ユーザに割り当てられた拡散符号の和である MAI を白色ガウス雑音ではなく現実的な多値マルコフ過程とすると、DLL は非線形確率差分方程式で記述される。第一の解析法はこの方程式に経路積分法を適用する方法である。この解析で得られた結果は数値シミュレーション結果とほぼ一致し、DLL の従来解析手法である線形解析よりも精度が向上した。しかし MAI が取るすべての値とその遷移を考慮するために計算量が膨大となり、解析が“通信路雑音なし”かつ“2 次ベースバンド DLL”に限られるという問題が生じた。
2. MAI の確率過程としての特徴の一部を要素間の結合に反映させて、DLL を確率ネットワークとしてモデル化できる。このモデルは大規模ネットワークであるが、MAI の他の特徴を含める必要がないので単純なネットワークである。第二の方法はこの確率ネットワークモデルに平均場近似を導入して DLL を解析する方法である。平均場近似を用いた確率ネットワーク解析の計算量は経路積分解析に比べ約 1/1000 に低減でき、かつ精度も経路積分解析に迫る結果が得られた。またこの計算量低減により、確率ネットワーク解析は、より一般的な通信を想定した“通信路雑音あり”かつ“より高次のノンコヒーレント DLL”も扱うことができ、解析結果はベースバンド DLL 時の解析精度よりも低下したが数値シミュレーション結果に近いことが確認できた。

また、拡散符号にマルコフ性を与えることとは別に、受信部において MAI をキャンセルすることにより所望の信号を高品質に復調する試みがなされている。しかし、キャンセルすべき MAI 成分を受信部で生成するためには、複数の伝送路推定などの複雑なアルゴリズムとそれを実行する大規模なハードウェアを必要とする。小型化、省電力化が求められる移動局にこれらの回路を導入することは非常に困難である。では逆に MAI を積極的に利用する復調は可能だろうか？ 周期入力を与えられた多安定系が雑音存在下にあっても、かつ入力が微弱であっても、系の出力には入力を反映した周期成分が小さいながらも含まれる。通常は弱いこの出力中

の成分がある強度の雑音下では増大することがある。この現象は確率共鳴と呼ばれる。MAI を雑音に対応させ、確率共鳴を原理とする復調は MAI を利用する一復調法であろう。

本研究では、DLL において MAI によって駆動される確率共鳴を生起させ、復調の可能性を探る。本来、DLL は逆拡散操作のため平均位相差ゼロで安定化する必要がある。その DLL の位相検出部の構成を変えることにより、二つの位相差の双方で平衡点をもつ双安定 DLL を構成できる。双安定 DLL に MAI を印加したところ、双安定 DLL の位相誤差に所望ユーザの情報信号成分が現れ、ある干渉ユーザ数の MAI が情報信号成分を最大化させることが観測できた。この結果は確率共鳴による復調の可能性を示唆している。

論文審査の結果の要旨

平成 24 年 2 月 8 日 (水) 13 時から 14 時まで博士学位論文発表会 (公聴会) を開催した。申請者が論文内容について説明を行い、その後、論文内容および専門知識に関する質疑応答を行った。

第三代携帯電話の通信方式として使われている符号化分割多重通信 (CDMA) の大きな問題の一つに多重接続干渉 (MAI: Multiple Access Interference) がある。各ユーザの送信タイミングが異なる非同期 CDMA では、M 系列や Gold 系列等の採用により MAI の低減を図っている。最近、マルコフ性を有し、2 値の値を遷移する系列、いわゆるマルコフ符号を拡散符号に用いると MAI の影響がさらに低減できることが報告されている。CDMA 受信部では、受信信号を拡散している信号に同期した同一の符号を受信信号に乗算する逆拡散操作により復号する。遅延ロックループ (DLL) はこの逆拡散操作において符号間の同期を維持させる回路である。DLL には位相誤差が生じるが、この現象が拡散信号のマルコフ性にどのように依存するか解析はこれまで行われていなかった。申請者は、マルコフ符号が印加された DLL の 2 つの解析法を提案している。MAI をガウス雑音ではなく現実的な多値マルコフ過程とすると、DLL は非線形確率差分方程式で記述される。第一の方法は、経路積分法を適用する方法である。この方法により従来の線形解析よりも精度が著しく向上したが、計算量が膨大で、かつ通信路雑音なしの場合に限られる。第二の方法は、DLL を確率ネットワークにモデル化する方法である。モデルは高次元系となるが、統計力学的解析手法である平均場近似を適用すると、第一の方法に比べ精度は若干劣るものの計算時間は約 1/1000 に低減でき、かつ通信路雑音を考慮した解析も可能となった。また、申請者は MAI を積極的に利用して復調する方法も検討している。周期入力を与えられた多安定系が雑音存在下で、かつ入力が微弱であっても系の出力には、入力を反映した周期成分が小さいながらも含まれる。通常は弱いこの成分がある強度の雑音下では増大することがあり、この現象は確率共鳴と呼ばれる。一般的に単安定な DLL を双安定な構成に変更した

ところ、雑音に対応した MAI が誘起する確率共鳴を観測できた。この結果は確率共鳴による復調の可能性を示唆している。本研究の成果は、NOLTA,IEICE(電子情報通信学会論文誌)2 編および査読付き国際会議 4 編で公表されており、本論文を総合的に評価した結果、博士学位論文審査は合格と判定した。