

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00068

研究課題名(和文)時系列モデリングに基づく多段型マッドパルス伝送の高速化

研究課題名(英文)Time series modeling of mud pulse telemetry with multiple modulators

研究代表者

小山 慎介 (Koyama, Shinsuke)

統計数理研究所・モデリング研究系・准教授

研究者番号：20589999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：マッドパルス伝送とは、掘削管内を坑底に向かって圧送されるマッドの流れに発生させた圧力波に情報を乗せて送信する方法である。本研究では、多段型マッドパルス伝送の高速化を検証するための方法を提示する。提示する方法は、時系列解析による伝送路のモデリングと最尤法を用いた信号推定に基づく。管内圧力波試験装置で取得したデータとシミュレーションを用いて伝送路容量を計算し、従来の相関処理に基づく方法と比較する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、多段型マッドパルス伝送の高速化を検証するための方法(圧力波データの時系列モデリングと信号の最尤推定)を提示したことである。特に、最尤推定は従来の相関処理による方法に比べて信号復元の精度が改善されることをシミュレーションで示し、より現実的な掘削中のデータを用いた検証への方向性を示した。

研究成果の概要(英文)：Mud pulse telemetry is widely used in "measurement while drilling (MWD)" systems to transmit signal from the bottom hole to the ground. In this study, we propose a signal processing method, which is based on time series modeling and the maximum likelihood principle, to enhance the transmission capacity via the multiple modulators. We show using a simulation that our method outperform the conventional correlation-based method in the transmission capacity.

研究分野：統計数理学

キーワード：マッドパルス伝送 時系列解析 伝送路容量

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

管内泥水圧力波(マッドパルス)伝送とは、ドリルパイプ内を循環する「泥水(マッド)」の流れに発生させた圧力波に乗せて情報を伝送する方法である。海洋底掘削において、ドリルで掘り進みながら同時に計測した坑底状況や地層データを船上に伝送するための主要な方法である。マッドパルスは、マッドの流れの一部を坑底にある弁(モジュレータ)で塞ぎ止めることによって生じる。モジュレータの回転周波数と位相を制御することで圧力波を変調することができる。現在主流の単段式モジュレータでは、伝送速度は高々数bpsである。リアルタイムで坑底状況をモニターしながら掘削を進めるために伝送速度の高速化が望まれている。海洋研究開発機構(JAMSTEC)は、伝送速度の高速化を図るため単段式モジュレータを直列に配置した「多段型モジュレータ」を開発した[1]。各段の回転周波数と位相を様々に組み合わせることで波形パターン数を増やすことで伝送速度を高速化することがねらいである。しかし、実際の海洋底掘削において、数千メートルものドリルパイプの中を伝播する圧力波の減衰と歪みは避けられないこと、またドリリングノイズや船体運動、潮流などさまざまな極限環境下におけるノイズが加わるので、シグナル/ノイズ(SN)比は極めて低い。さらに、多段型モジュレータ機構の構造的制約から、マッドパルスの帯域幅は制限される。相関処理による信号検出では多段型モジュレータの利点を最大限に引き出すことができず、伝送速度の高速化は課題として残されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多段型マッドパルスによる伝送速度高速化の可能性を検証することである。伝送速度の高速化を実現するためには、SN比の低い圧力波計測値から信号を復元する情報処理技術が求められる。本研究では、時系列解析の手法を用いて管内圧力波伝播を情報伝送路としてモデル化し、それに基づく最適な信号検出という方法を提示する。

3. 研究の方法

管内圧力波試験装置[1]を稼働して取得した圧力波データから情報伝送路をモデル化し、モデルに基づいて伝送路容量を求める。

(1) 管内圧力波試験装置によるデータ取得

水を循環させた全長2メートルのホースの先端部に取り付けられた3段式モジュレータで圧力波を発生させ、モジュレータの上部に取り付けられた圧力計で水圧を計測する。各モジュレータは与えられた初期位相と周波数で回転する。各モジュレータの開口率を与えると、試験装置は全開効率にしたがって圧力波を発生させ水圧が計測される。開口率および水圧は1,000Hzのサンプリング周波数で計測される。

(2) 伝送路モデル

モジュレータの全開口率を入力とし圧力計測値を出力とする線形システムを仮定する。計測データからインパルス応答を求めるため、本研究ではスペクトル法とパラメトリック法を用い、両者を比較する。

(3) 伝送路容量

モジュレータ各段の周波数と位相の違いによりN種類のパルス波形を作り、パルス列に情報を乗せる離散通信路を考える。パルス波形はモジュレータ各段の周波数と初期位相を与えると決まる。

計測された水圧データからもとのパルスを復元するために最尤推定を採用し、相関処理によるマッチング方法と比較する。

試験装置で発生させる圧力波にはほとんどノイズが乗っていないため、シミュレーションで生成したノイズを加えて伝送路容量を計算する。ノイズモデルには、帯域幅が制限された白色ガウスノイズを用いる。

4. 研究成果

(1) 伝送路モデルの推定

伝送路モデルの推定のために、一定の周波数で管内圧力波試験装置を稼働させた長さ25secのデータを、1Hzから12Hzまで0.5Hz刻みで計23組用意した。このデータを用いてスペクトル法とパラメトリック法で伝送路を推定した。また、評価には1パルスあたり4bitとしてASCIIコードで符号化した26種のアルファベットを送信したデータを8組用いた。圧力計測値と推定したモデルに基づく圧力予測値の平均二乗誤差の平方根を評価基準とした。スペクトル法では誤差は4.76(KPa)、パラメトリック法では1.63(KPa)であった。図1に評価用データの圧力計測値およびパラメトリック法とスペクトル法による予測値を示す。

伝送路の推定にはパラメトリック法の方がスペクトル法よりも優れている結果を得た。モジュレータ機構の構造的制約によりパルスの周波数帯域が制限されているため、スペクトル法ではそれ以外の周波数応答特性を表現できない。一方でパラメトリックモデルはパルスの帯域外の応答特性も含まれている。したがって、周波数帯域が著しく制限されている場合はパラメトリック

ク法の方がスペクトル法よりも優れている。

(2) 伝送路容量

パラメトリック法で推定した伝送路に帯域制限白色ガウスノイズを加えたシミュレーションを用いて伝送路容量を計算した。送信するパルスは、長さを 250msec (ホールド時間も含めると 500msec) として、モジュレータ格段の周波数は 4, 7, 10Hz、初期位相分解能を等間隔に 4 として作成した。これらのパルスを伝送路に入力して、ノイズを加えた圧力計測値から最尤推定および相関処理を用いてもとのパルスを復元した。ノイズパラメータ (特性周波数とパワー) を様々に変えて伝送路容量を計算した結果を図 2 に示す。広い範囲の SN 比とノイズの特性周波数にわたって最尤推定の方が相関処理よりも伝送路容量が大きい。特に SN 比が小さいところでその傾向は顕著であり、容量差が大きいところで 1.5~2 倍近くになる。ノイズの特性周波数がパルスの周波数帯域 (10Hz あたり) と重なるところで容量が小さくなることも見て取ることができる。

最尤推定は相関処理に比べてパルスの復元に優れている結果を得た。最尤推定と相関処理の原理的な違いは、前者はノイズを含む伝送路の性質を陽に取り込んでいることである。伝送路の特性が正しくモデル化されているときに最尤法は統計的に最良な推定を与える。

(3) 本研究の問題点

試験装置で発生させた圧力波にはノイズと信号の歪みがないため、シミュレーションで生成したノイズを加えた。しかし実際の掘削中では、掘削ノイズやマッドを圧送するポンプノイズ、管内の反射などと影響を受けて、受信する圧力波はもとの信号とかなり異なったものになるはずである。本来取り組むべき問題は、このような状況において伝送路容量を求めることであるが、本研究ではこの問題を扱うことはできなかった。

本研究で求めた伝送路容量はあくまで達成可能な理論的上限であって、実際の伝送速度は符号化法に依存する。多段型モジュレータで作られるパルス波形は互いに相関が大きく非対称であるため、符号の設計は容易ではない。一方、互いに相関がない直交パルス波形を多段型モジュレータで作ろうとすると、パターン数は著しく制限される。モジュレータの多段化による伝送速度の高速化を実用的な性能で実現することができるかどうかは問題として残されている。

本研究の意義は、多段型マッドパルス伝送の高速化を検証するための方法 (圧力波データの時系列モデリングと信号の最尤推定) を提示したことである。特に、最尤推定は従来の相関処理による方法に比べて信号復元の精度が改善されることをシミュレーションで示した。より現実的な掘削中のデータを用いて伝送速度の高速化を検証することが今後の課題として挙げられる。

<引用文献>

[1] WO2013151103 A1. 眞本悠一, 石渡隼也, 宮崎 剛. 「送信装置, 受信装置, 受信システム及び受信プログラム」独立行政法人海洋研究開発機構, 2013.

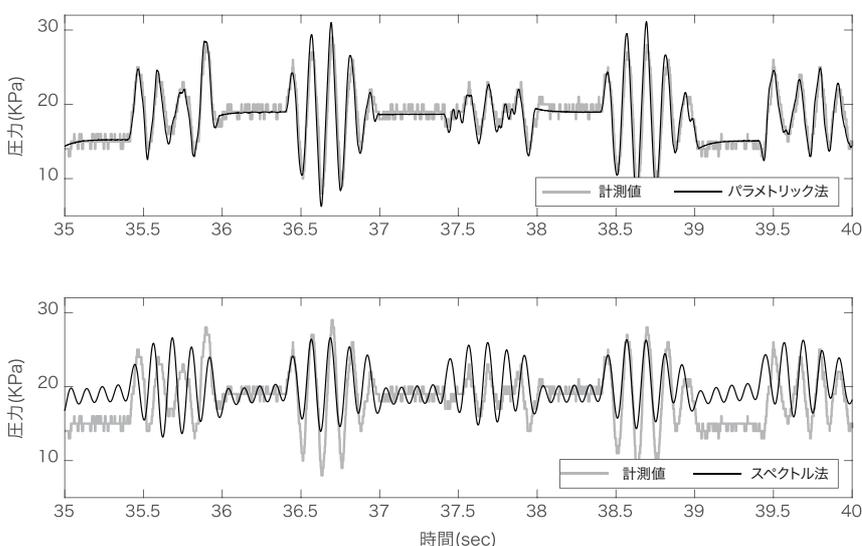


図 1: 上: 計測値とパラメトリック法による予測値。下: 計測値とスペクトル法による予測値。

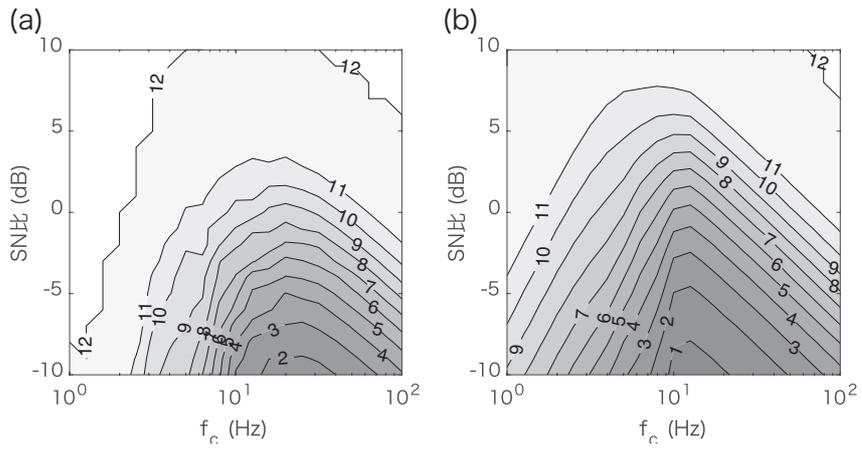


図 2： (a) 最尤推定および (b) 相関処理を用いた場合の伝送路容量 (bps) の等高線図。縦軸と横軸はそれぞれ SN 比とノイズの特性周波数を表す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小山慎介, 石渡隼也	4. 巻 No.1211
2. 論文標題 時系列モデリングに基づく多段型マッドパルス伝送の高速化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISM Research Memorandum	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
研究協力者	石渡 隼也 (Ishiwata Jyunya)	海洋研究開発機構・研究プラットフォーム運用開発部門 運用部 船舶工務グループ	