

Bent 系列信号を用いた SSBL 音響測位方式 Super short baseline acoustic positioning method using bent sequence

学籍番号 47126662 鹿島 徹

指導教員 浅田 昭 教授

Keywords: Bent 系列, SSBL, PN 系列, スペクトル拡散, Welch の下界

Keywords: Bent sequence, SSBL, PN sequence, Spread spectrum, Welch lower bound

1. 序論、提案手法

近年、海底資源開発のために広域かつ効率的な調査手法の開発の必要性がある。そこで、本論文では、効率的な SSBL 音響測位方式を広域で展開するための要素技術の提案を行う。

SSBL 音響測位方式を広域で展開するためには、1 基のトランスポンダーの応答距離は限られているので、複数基のトランスポンダーを海底に設置する必要がある。このとき、各トランスポンダーの信号を区別し、所望のトランスポンダーの信号を取り出せる必要が出てくるため、PN 系列を用いたスペクトル拡散方式を用いて符号分割多重接続をする必要がある。しかし、スペクトル拡散方式には符号間干渉の問題があり、符号間の相互相関値が大きい系列を用いると信号の検出が困難になる場合がある。

現在、スペクトル拡散方式を用いた SSBL 方式に関しては M 系列信号を用いた SSBL 音響測位方式があるが、符号分割多重接続を行う上で M 系列を用いた場合、M 系列の相互相関値が大きいため、信号が混信すると、所望の信号を取り出せない可能性がある。

そこで本論文では、M 系列に代わる相関特性が優れていて周期相互相関値が低く、一定な PN 系列である Bent 系列を用いた手法を提案する。

2. Welch の下界及び Bent 系列

2.1 Welch の下界[1]

Welch の下界は PN 系列の相関関数の限界として定義されていて、相関係数の最大値 R_{\max} とすると、

$$R_{\max} \geq N \left| \frac{M-1}{NM-1} \right|^{1/2} \quad (1)$$

とあらわすことができる。ただし、 N が系列の周期、 M が系列数とする。ここで、式(1)の右辺にある M が大きければ、 $R_{\max} \approx N^{1/2}$ と近似でき、 R_{\max} が $N^{1/2}$ に近い PN 系列の相関特性が良いとされる。

2.2 Bent 系列[2]

周期 $N = 2^n - 1$ の 2 相系列は有限体 $GF(2^n)$ の元 x を有限体 $GF(2)$ または実数に写像する関数 $f_a(x)$ を用いて

$$s_a(i) = \omega^{f_a(x)}, \omega = -1 \quad (2)$$

と表せる。そして、Bent 系列は Trace 関数を用いて表せ、この解析で用いる Trace 変換は

$$\hat{F}_a(\lambda) = 2^{-n/2} \sum_{x \in GF(2^n)} \omega^{f_a(x) + Tr(x\lambda)} \quad (3)$$

と表せる。ここで、 $f_a(0) = 0$ とすると周期相関関数 R_{ab} は

このとき、 $f_a(x)$ が Bent 関数であれば、周期相関関数の最大値、 $R_{ab\max}(\tau)$ は

$$R_{ab\max}(\tau) = 2^{n/2} + 1 \quad (4)$$

となる。これより Bent 関数は Welch の下界に近い周期相関値を持つように設計された関数であることがわかる。

そして、Bent 関数は $f(x)$

$$f(x) = x_1^T x_2 + g(x_2) \quad (5)$$

$$x = [x_1, x_2]^T \quad (6)$$

と表すことができる。ここで、 X は線形行列、 $g(x_2)$ は任意関数である。

このとき、Bent 関数を用いた Bent 系列 $B = \{b_i \mid i = 0, 1, \dots, N-2\}$ ($N = 2^n$) は

$$b_i = Tr^n(\sigma \alpha^i) + f[L(\alpha^i)] + L(\alpha^i)^T z \quad (7)$$

と表せる。ここで、 α は $GF(2^n)$ の原始元、 $\sigma \in GF(2^n)$ の非 0 元、 $z \in GF(2^{n/2})$ であり、 L は Bent 系列の線形写像である。Bent 系列の特徴としては、Welch の下界に近い周期相関値を持っているため、どの Bent 系列の周期相互相関の値が一定に低く保たれている。

3. Bent 系列と M 系列の相関値の比較

提案手法に用いる Bent 系列を従来手法に用いられている M 系列と比較することで、評価した。今回は 8 次 Bent 系列(255 bit)を実際に用いて実験をするため、8 次 Bent 系列と 8 次 M 系列(255 bit)との比較を行った。そして、8 次 Bent 系列、M 系列は双方とも 16 個の系列を持っており、SSBL 測位に用いる信号長は 102 msec、周波数 10 kHz 搬送波で、4 波長ごとに M 系列及び Bent 系列のビットに応じて位相変調した信号を用いて、相関値の比較をしている。

3.1 周期相関の比較

Bent 系列と M 系列の繰り返し信号を用いて周期相関値を求め比較する。Fig.1 に Bent 系列、Fig.2 に M 系列の相関結果を示す。また、Fig.3 に Bent 系列と M 系列の相互相関値の最大値のヒストグラムを示す。これらの結果から、Bent 系列は一定で低い周期相互相関値を持っており、M 系列の周期相互相関値はばらつきが大きいことがわかる。

3.2 1 周期のみの相関の比較

3.1 から Bent 系列が優れた周期相関特性を持っていることは示したが、実際に SSBL 測位に用いるものは繰り返し信号ではなく 1 周期のみの信号波形であるため、1 周期のみの相関結果についても比較した。Fig.4 に Bent 系列の相関結果、Fig.5 に M 系列の相関結果、Fig.6 にそれぞれの相互相関値の最大値のヒストグラムを示した。これらの結果より、1 周期のみの相関処理においても Bent 系列は M 系列と比べて低い相互相関値をもっていて、ばらつきが小さいことがわかる。

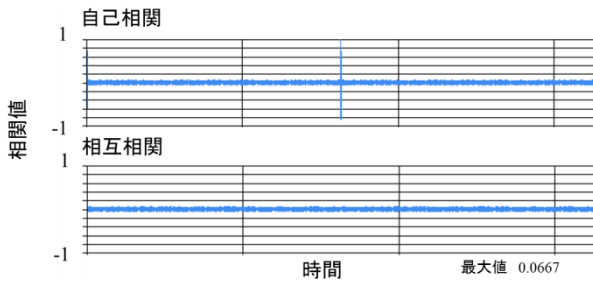


Fig.1 Inter period correlation of Bent sequence

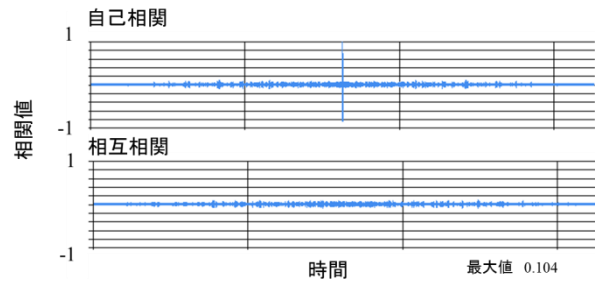


Fig.4 Only a period correlation of Bent sequence

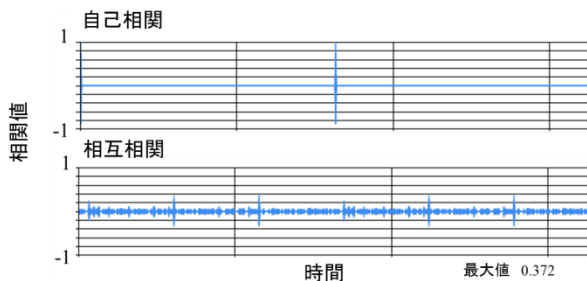


Fig.2 Inter period correlation of M sequence

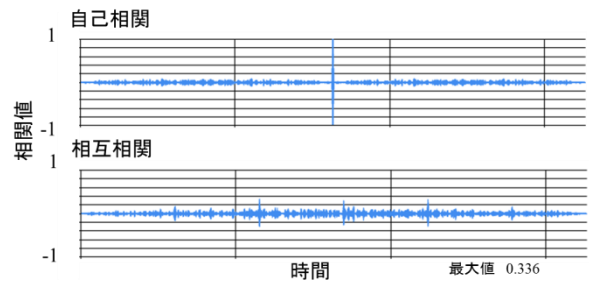


Fig.5 Only a period correlation of M sequence

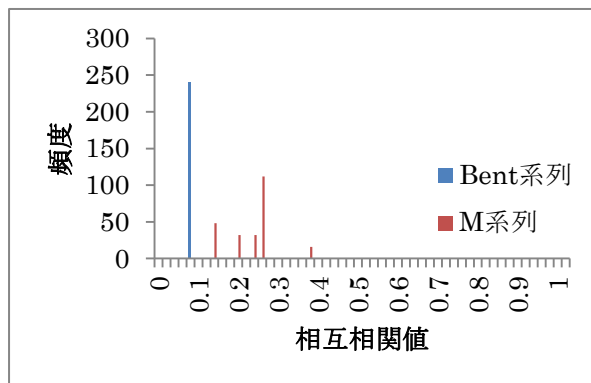


Fig.3 Histogram of the inter period cross correlation value

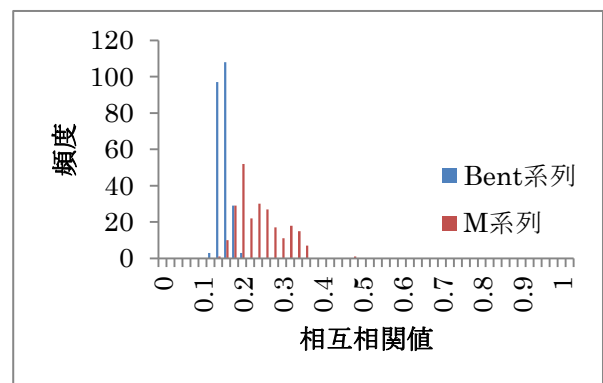


Fig.6 Histogram of the only a period cross correlation value

4. シミュレーションによる提案手法の検討

海底局から発信される信号は、海中伝搬における様々な影響(伝搬損失、雑音、海面残響その他の散乱体によるマルチパスフェージング)を受け、発信直後とは多少異なった信号波形となっている。

このような影響の下、着目する海底局からの信号に対する高い自己相関値と、異なる海底局からの信号に対する低い相互相関値を実現する事ができるかどうかを、ソーナー方程式や音線伝搬理論、雑音・残響等の散乱理論を用いてシミュレーションを行い提案手法の有効性について検討を行った。

4.1 シミュレーションの条件

Fig.7 にシミュレーション環境を示した。

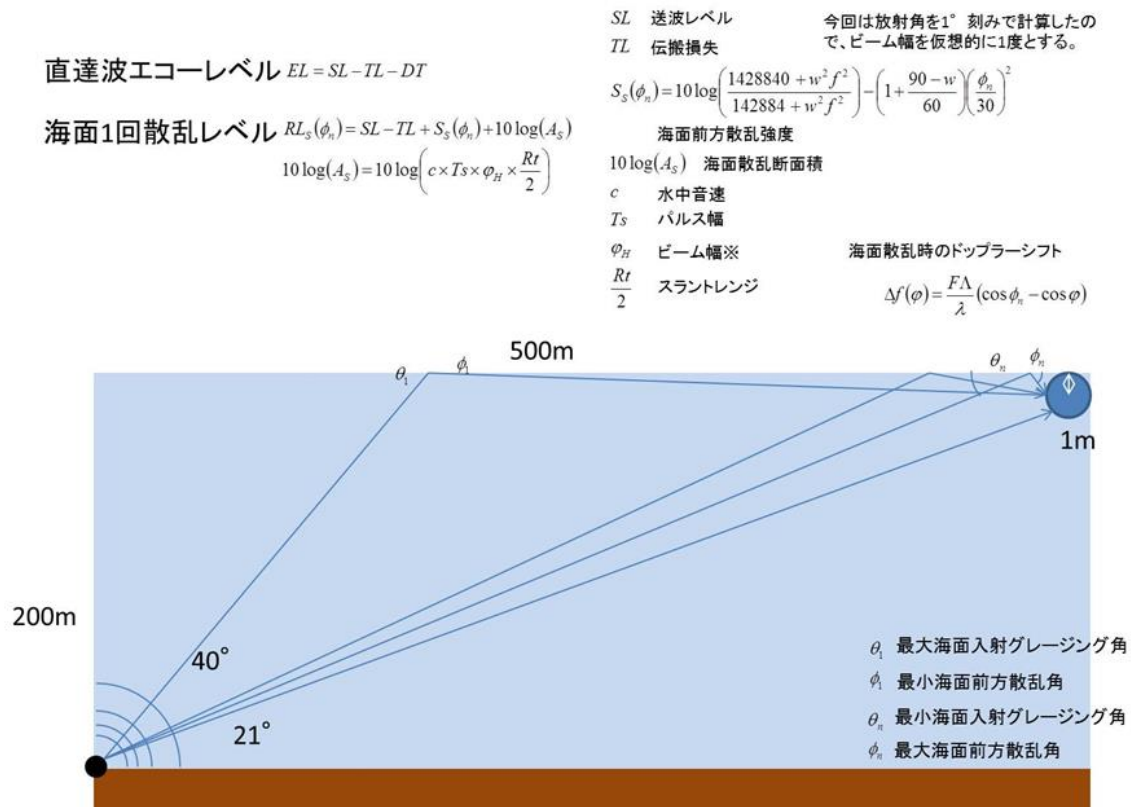


Fig.7 simulation environment

4.2 シミュレーションの解析結果、考察

異なる系列同士の相互相関の値の平均やそのばらつきを見るために、シミュレーションで海中伝搬した受信信号に対して各系列同士の相互相関値を取って、最後に自己相関値のピークで割戻して正規化し、ヒストグラム(Fig.8)を作成した。Fig.8を見るとM系列の相互相関値に対し、Bent系列の相互相関はまとまっていて低い値であることがわかる。また、3で求めたヒストグラム(Fig.6)と比べると、Fig.8の平均、標準偏差が小さくなった。これはシミュレーションの計算においては、ホワイトノイズと遅延波を重ねあわせることで受信波を作成したため、無相関のエネルギー成分が相対的に大きくなるため、このような結果となったと考えられる。遅延波についても、基本的には位相についての遅延やドップラーシフトがある他は波形としては送信段階の信号と同じものであるとしたため、重ね合わせによって波形の歪みは生じているものの、そのパワーも小さいため、全体として相互相関値を大きくばらつかせるような影響を及ぼす可能性は小さいと考えられる。

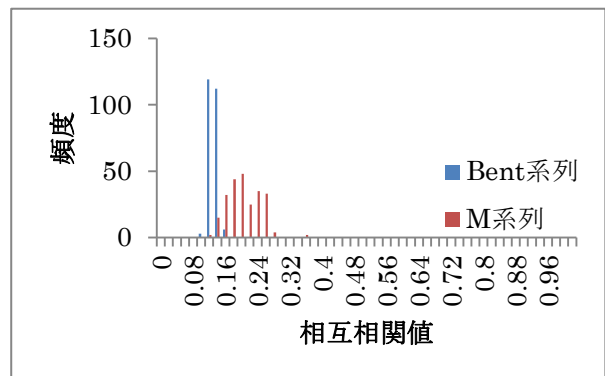


Fig.8 Histogram of the cross correlation value from the receive signal by simulation

5. 実海域における提案手法の検討

5.1 実海域実験

2013年2月1日～3日に千葉県館山市館山湾で実海域実験を行った。本実験では、ミラートランスポンダー(MT)を海底に2基(ID02, ID04)設置し、曳航体にSSBL送受波器、GPS受信機、RLGを搭載させ、海面付近を曳航させた。MTのID信号は8次Bent系列を用いているため、MTのID信号を用いて、提案手法の有効性の検討を行った。Table.1にSSBLの収録状況、Fig.9に収録信号を示した

5.1 信号解析

今回はID02の信号に関して、信号処理を行った。まず短時間フーリエ変換(STFT)を用いて、MTのID信号の検出をし、ID信号部分を切り出す。そして、切り出した部分と各ID信号とで相関処理を行う(Fig.10)。最後にピークの立った自己相関値の最大値を用いて相互相関値の最大値を正規化し、ヒストグラムを作成した(Fig.11)。

5.2 実海域実験の結果、考察

3、4の結果と比較し、考察した。ここでは、ヒストグラムの半値幅による考察を行った。Table.2に各ヒストグラムの半値幅の結果を示したが、実海域においても理論、シミュレーションと同様の結果が得られた。また、理論値、シミュレーションで求めた従来手法の結果と比べても、提案手法の半値幅は小さく、まとまっていることがわかる。これより、提案手法は実海域においても、従来手法よりも有効性があることが保障されることが考えられる。

Table.1 SSBL recording condition

送波間隔	10 秒間
信号収録時間	送波から 8 秒間
送波の周波数	10kHz
サンプリング周波数	400kHz

Table.2 FWHM of histogram

	Bent 系列	M 系列
3.理論(1 周期のみ)	0.02	0.08
4.シミュレーション	0.02	0.1
5.実海域	0.02	

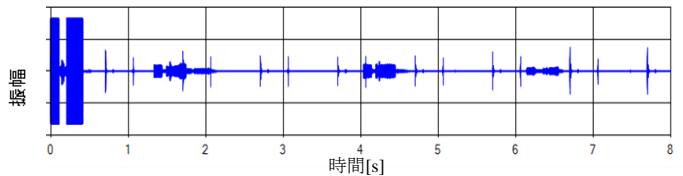


Fig.9 Recorded data

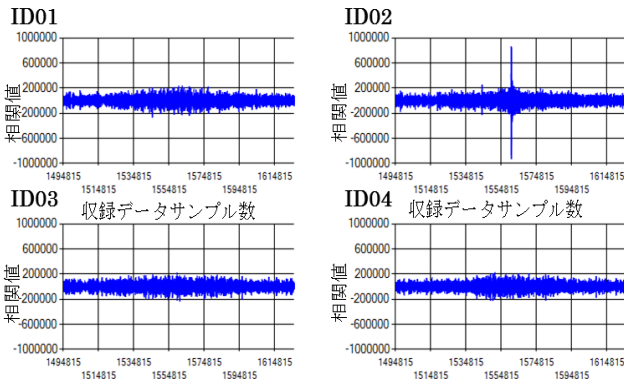


Fig.10 Correlation result of the recording signal in the real sea area

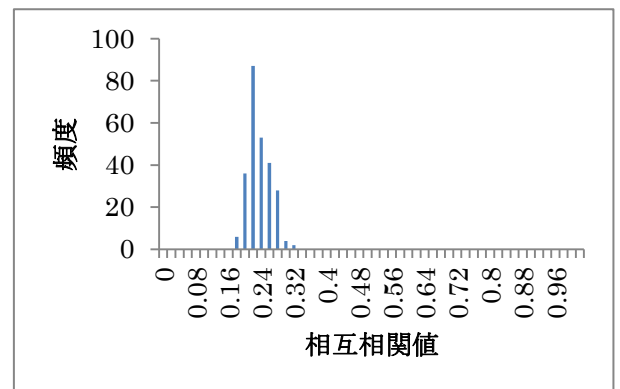


Fig.11 Histogram of the cross correlation value from the receive signal in the real sea area test

6. まとめ

本論文において、海底を広域かつ効率的に調査する手法として、海底に複数基のトランスポンダーを基準局として設置し、SSBL音響測位方式によって測位をする際に起こる各トランスポンダーの信号の混信による測位劣化を防ぐ新手法として、「Bent系列信号を用いたSSBL音響測位方式」を提案した。そして、理論上とシミュレーション上で、M系列を用いた従来手法と比較し、従来手法よりも提案手法の有効性を示すことができた。加えて、実海域においても提案手法はBent系列の優れた性質を保つことが確認され、有効性があることを示すことができた。

7. 参考文献

- [1]松藤信哉. スペクトル拡散通信で用いられる周期相関の低い拡散系列. 電気情報通信学会技術研究報告. Vol.91, No.10, pp.5-12, 1991.
- [2]J.D.Olsen, R.A.Scholtz, L.R.Welch. Bent-Function Sequence, IEEE Trans. Inform.Theory, Vol.IT-28, No.6, pp.858-864, 1982.