

送電線用高速デジタル電力線搬送のシンボル タイミング生成に用いる自己相関器の検討

花海 丞* (通研電気工業), 鈴木 英祐 (東北電力), 佐々木 範雄 (通研電気工業)

A study of autocorrelator for synchronous acquisition of High-speed DPLC

Tasuku Hanaumi (Tsuken Electric Industrial Co., Ltd.), Eisuke Suzuki (Tohoku Electric Power Co., Inc.),

Norio Sasaki (Tsuken Electric Industrial Co., Ltd.)

1. まえがき

送電線を伝送媒体とする電力線搬送は、電力保安通信用として古くから電力会社等で適用されている。電力保安通信網における IP 技術適用の進展にもなつて、伝送方式をデジタル化したデジタル電力線搬送装置が製品化されたが、近年、IP 化のさらなる進展により高速化が要求されてきている。送電線用電力線搬送では、限られた周波数帯域での伝送となるため、64QAM のような高多値化変調方式が用いられる。また、送電線路では信号の減衰が小さいことから分岐点や終端から発生する反射波が遅延波となって符号間干渉を引き起こし易い。長遅延となる伝送路での高多値化変調において良好な BER 特性を得るためには、送受信でのシンボルタイミングを高精度に一致させる必要がある。

本稿では、送電線用電力線搬送で 1Mbps 程度の高速伝送を可能とする高精度なシンボルタイミングの生成に用いる相関器について、偶対称性を持つ Zadoff-Chu 系列をトレーニング系列に用いる伝送方式において、相関値を算出しそのピーク値が得られるタイミングからシンボルタイミングを生成する相関器を、小さい回路規模で実現する自己相関器について検討した。

2. 自己相関器によるシンボルタイミング生成

送電線用高速デジタル電力線搬送では、データブロックの前後にトレーニング系列 (TS : Training sequence) が配置されるシングルキャリアブロック伝送を適用し、TS には式(1)に示される Zadoff-Chu 系列を用いる⁽¹⁾。 N_{ts} は TS のシンボル数であり、定数 m はピーク対平均電力比を小さくするために選択される整数であり、 N_{ts} と互いに素となり N_{ts} より小さい値である。Zadoff-Chu 系列は偶対称となる。

$$u(t) = \begin{cases} \exp\left(-j\frac{\pi m t^2}{N_{ts}}\right), & N_{ts} \in \text{even number} \\ \exp\left(-j\frac{\pi m t(t+1)}{N_{ts}}\right), & N_{ts} \in \text{odd number} \end{cases} \quad (1)$$

図 1 に検討した自己相関器を示す。自己相関値 $C_a(t)$ は、式(2)となる。 k は TS のオーバーサンプリング数、 M は乗算器の数、 a は Zadoff-Chu 系列において偶対称となる最小距離

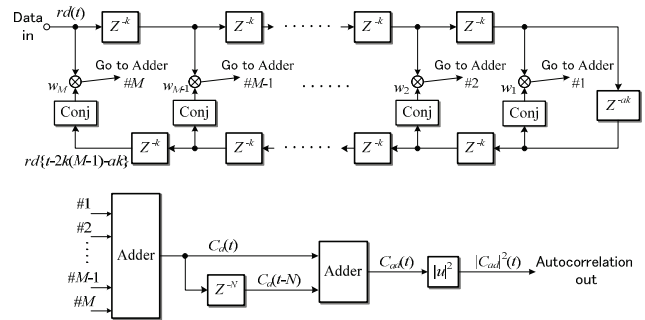


図 1 自己相関器

Fig.1. Autocorrelator

のシンボル数、 $rd(t)$ は時間 t における受信データの値、 $rd(t)^*$ はその複素共役である。

$$C_a(t) = \sum_{l=0}^{M-1} rd(t-lk) rd^*\{t-2k(M-1)-ak+lk\} \quad (2)$$

自己相関値 $C_a(t)$ に基づいて相関値のピークを求め、シンボルタイミングを得ることができるが、ブロック伝送において TS がデータブロックの前方と後方に配置されることから、複数箇所での $C_a(t)$ を用いてより大きな相関値のピークを式(3)により得ることができる。

$$C_{ad}(t) = C_a(t) + C_a(t-N) \quad (3)$$

$C_{ad}(t)$ は、現在の自己相関値出力 $C_a(t)$ と、 N_{ts} の 1/2 のシンボル数に相当するサンプル数 N 遅延した自己相関値出力 $C_a(t-N)$ の和である。自己相関器の出力は、 $|C_{ad}(t)|^2$ となる。

3. 自己相関器と相互相関器の比較

検討した自己相関器の検証のため、従来の相互相関器と出力時間特性についてシミュレーションによる比較検証を行った。

Zadoff-Chu 系列を TS として用いる場合の相互相関値 $C(t)$ は式(4)となり、相互相関器出力は式(5)となる。

$$C(t) = \sum_{l=0}^{M-1} \{rd(t-lk)Chu_{M-l}^*\} \quad (4)$$

$$|C(t)|^2 = C(t)C(t)^* \quad (5)$$

ここで、 Chu_{M-l}^* は参照信号となる Zadoff-Chu 系列の複素共役である。

図2および図3に、変調方式が64QAM、 S/N が35dB、遅延波あり、送受間の動作クロックの周波数偏差が3Hzでのシミュレーションによる相関器出力を示す。図2は $M=16$ での自己相関器の出力特性、図3は $M=16$ 、 $M=32$ での相互相関器の出力特性である。いずれの図も縦軸が相関器出力を最大値で正規化した値、横軸がサンプリング数である。

図2に示す自己相関器の出力は、 $N \times k$ のサンプリング間隔で明瞭に2個所のピークが現れており、他のピークの値とは大きな差があるため、シンボルタイミングの抽出に適用できると考える。一方、図3に示す相互相関器の出力は、 $M=16$ では6個所のピークにおいて、その値に大きな差はなく、シンボルタイミングの抽出は困難である。また、 $M=32$ では2個所のピークが $N_b \times k$ のサンプリング間隔で大きく現れており、シンボルタイミングの抽出に適用できると考えるが、伝送路上の雑音増加等の影響を考慮するとシンボルタイミングを抽出するための閾値の設定が困難である。

自己相関器では、自身の信号を利用し、受信信号のみから相関を求めているため、伝送路上の遅延波や周波数偏差等の伝送路特性の影響を受け難い。一方、相互相関器では、受信信号と、受信側に予め保持した既知データとの相関を求めるため、伝送路特性の影響を受け易い。乗算器の数 M を増やすことで相関器出力のピークはより明瞭となり、シンボルタイミングの抽出が可能となると考えるが、そのために必要となる乗算器の数は、自己相関器のそれよりも多くなる。乗算器の数の増加は、回路規模を大きくすることになり、実機製作において使用するデバイスのコストを増大させることとなる。

また、図4に、自己相関器と相互相関器の相関器出力ピークの応答特性を示す。縦軸が相関器出力を最大値で正規化した値、横軸がピーク位置のサンプリング点を0としたときの相対サンプリング数である。自己相関器の応答特性は、前述した伝送路特性の影響を受け難いことから、相互相関器と比べて急峻なピークを持つ特性が得られ、シンボルタイミングの位置を推測するための回路規模を小さくすることができる。

4. むすび

送電線用高速デジタル電力線搬送に適用する高精度なシンボルタイミングを生成するため、シングルキャリアブロッック伝送に用いる Zadoff-Chu 系列の偶対称性を利用した自己相関器について検討した。

シミュレーションによる相互相関器との比較検証の結果、検討した自己相関器は、相互相関器に比べて、伝送路の雑音や歪みの影響を受け難く、長遅延伝送路となる送電線用高速電力線搬送でのシンボルタイミング生成に有効であることを確認した。また、相互相関器に比べて回路規模を小さく

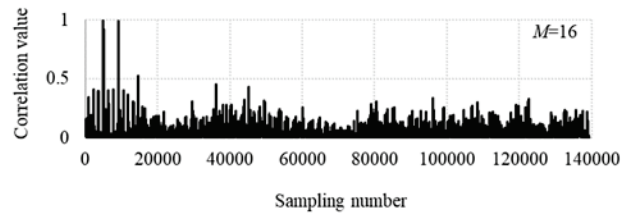


図2 自己相関器出力

Fig.2. Output value of autocorrelator

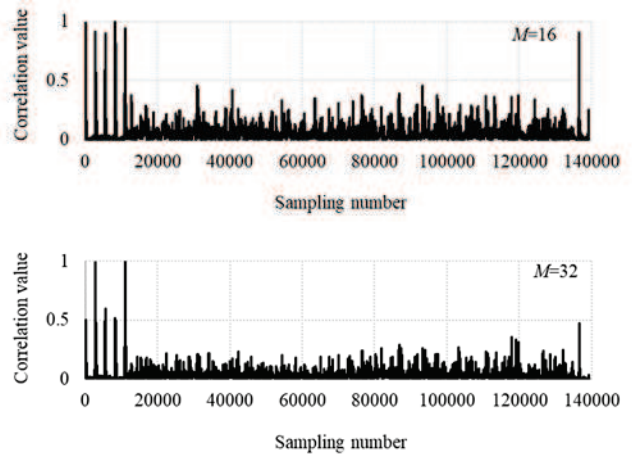


図3 相互相関器出力

Fig.3. Output value of cross-correlator

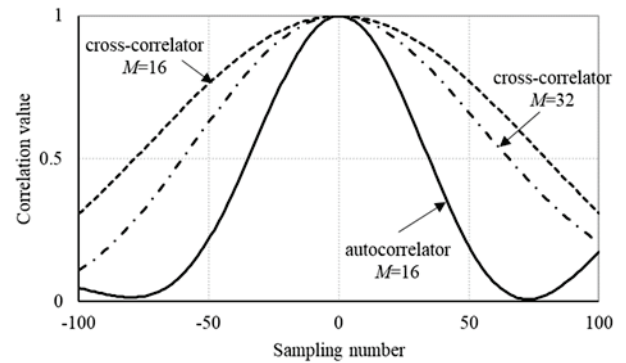


図4 相関器出力ピークの応答特性

Fig.4. Peak response of correlator output

することができ、実機製作においてもコストを抑えることができるため有効である。

文献

- (1) 佐々木範雄・陳強・安達文幸：「送電線用高速デジタル電力線搬送における周波数領域等化方式の検討」, 電学論C, Vol.138, No.12, pp.1529-1537(2018)