

送電線デジタル電力線搬送の適応等化器における簡易発散防止法

正員 佐々木 範雄* 非会員 花海 丞**
非会員 織田 健志** 非会員 安達 文幸***

A Simple Divergence Prevention Scheme for Adaptive Equalizer in Digital Power Line Carrier Systems

Norio Sasaki*, Member, Tasuku Hanaumi**, Non-member, Takeshi Oda**, Non-member, Fumiyuki Adachi***, Non-member

(2015年8月3日受付, 2016年3月16日再受付)

An adaptive equalizer is adopted in a high speed digital power line carrier system. A surge noise is produced in a digital power line carrier system by opening and closing operations of an electrical equipment. This surge noise causes a serious problem, which is the divergence of tap coefficient of adaptive equalizer. In this paper, we propose a simple tap coefficient divergence prevention scheme and confirm its effectiveness by an experiment.

キーワード: 送電線, 電力線搬送, デジタル伝送, 適応等化器, サージ雑音

Keywords: Power line transmission, Power line carrier, Digital transmission, Adaptive equalizer, Surge noise

1. まえがき

送電線間の送電線路を用いるデジタル電力線搬送では64QAM (Quadrature Amplitude Modulation) を用いたビットレート 192 kbps の伝送方式を採用している。使用帯域は 100 kHz~450 kHz で、この帯域内に 50 kHz 幅の通信チャネルが 50 kHz 間隔で 7 チャンネル配置されている。伝送路となる送電線路は分岐箇所や電気所端などから生ずる複数の長遅延な反射波が存在するため⁽¹⁾、符号間干渉によって BER (Bit Error Rate) 特性が大きく劣化する。筆者らは LMS (Least Mean Square) アルゴリズムを用いる線形トランスバースル型適応等化器を送電線デジタル電力線搬送方式に適用することを検討し、最適タップ数を理論解析により明らかにするとともに、ステップサイズパラメータ、トレーニング系列および系列長の最適値⁽²⁾⁽³⁾を計算機シミュレーションにより明らかにしている。適応等化器への入力信号には熱雑音の他に、発電所に設置されている遮断器の開閉操作で生じるサージ雑音や、雷放電によるサージ雑音が連続 (数 ms) して印加される場合がある。このため、適応等化器のタップ係数が誤った方向へと修正されてしまう発散が発生することがある。

そこで、本論文ではサージ雑音印加時に、適応等化器のタップ係数の発散現象について考察し、その発散防止法を提案する。そして提案法が有効なことを実験結果から示す。

2. サージ雑音による等化器タップ係数の発散

(2-1) 発散現象の観測 送電線と結合するカップリングフィルタ⁽¹⁾ (通過域幅 100 kHz~450 kHz) に絶縁トランスと保安器を接続し、遮断器開閉操作時に保安器の出力点で測定したサージ雑音の実測電圧波形の一例を図 1 に示す。サージ雑音電圧のピーク値は、等化器入力信号の実効値 (約 0.6 V) より 80 倍程度の大きな値 (約 50 V) で、その立上がり時間は約 200 μ s と急峻で、継続間は 3 ms 程度のサージ雑音である。デジタル電力線搬送装置には過大な入力電圧から装置を保護する、前述した絶縁トランスと保安器が取り付けられている。しかし、今回測定された立上がり時間と電圧を有するサージ雑音は、適用している保安器のリミッター動作電圧より低く、このサージ雑音がデジタル電力線搬送装置の LPF (Low Pass Filter) 部へとそのまま入力される。ここで、受信信号に対し適応等化器では次式に示す

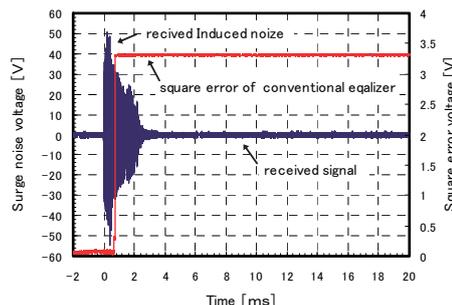


Fig. 1. Induced surge noise voltage and LMS mean square error.

* 東北電力 (株) 研究開発センター
〒981-0952 仙台市青葉区中山 7-2-1
Tohoku Electric Power Co., Inc.
7-2-1, Nakayama, Aoba-ku, Sendai 981-0952, Japan
** 通研電気工業 (株)
〒981-3206 仙台市泉区明通 3-9
Tsuken Electric Industrial Co., Ltd.
3-9, Akedouri, Izumi-ku, Sendai 981-3206, Japan
*** 東北大学
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 05
Tohoku University
05, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

複素 LMS アルゴリズムによりタップ係数を更新している⁽²⁾。

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{u}(n) e^*(n) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\mathbf{w}(n+1)$ は更新後の適応等化器のタップ係数ベクトル、 $\mathbf{w}(n)$ は現在のタップ係数ベクトル、 μ はステップサイズパラメータ、 $\mathbf{u}(n)$ は適応等化器へのタップ入力ベクトル、 $e^*(n)$ は適応等化器の出力と参照信号 (参照シンボル) との誤差 (等化誤差) の複素共役であり、本観測では等化器タップ数 $M=21$ および $\mu=0.001$ としている。また図 1 には、一次 IIR フィルタの忘却係数を $\alpha=0.992$ とした時の等化誤差 $e(n)$ の実効値も示している。サージ雑音印加後の等化器誤差 $e(n)$ の実効値は DAC (Digital Analog Converter) の最大出力電圧値 (3.3 V) まで上昇しサージ雑音が無くなった後でも、この電圧値が継続している。これが等化器タップ係数の発散である。

〈2・2〉 考 察 64QAM を用いる電力線搬送におけるサージ雑音印加時の適応等化器出力を示したのが図 2 である。サージ雑音の振幅値が大きいことで、等化器出力は 64QAM の最外周シンボルより更に外側に振れるので、(1) 式に示す等化誤差 $e(n)$ は著しく増大し、タップ係数が発散してしまう。タップ係数の発散を防止するためには、サージ雑音を検知された時に、(1) 式に示すステップサイズパラメータ μ をゼロに変更して、タップ係数の更新を停止すればよい。

3. サージ雑音の検出と発散防止法

〈3・1〉 サージ雑音検出方法 定常雑音の統計的性質を把握することで、サージ雑音発生の有無を検出する方法について説明する。

送電線路で発生する雑音は熱雑音にインパルス雑音が 0.01% 以下のわずかな確率で重畳している雑音であるので、ほとんどの時間では熱雑音である⁽¹⁾。このことから図 2 に示すように、送信シンボルを S2 とした場合、複素熱雑音が付加された受信 S2 シンボルは送信シンボル点を中心に実軸および虚軸ともガウス分布となるので、(1) 式の等化誤差 $e(n)$ も同様な分布を示すことになる。したがって、等化器出力が送信シンボル S2 を中心として最少信号間距離内 ($\pm\delta$) に存在する場合は、送信シンボルが正しく判定され、等化誤差 $e(n)$ を正しく算出できる。また、等化器出力が送信シンボル S2 の隣接シンボル S1 あるいは S3 の領域内に入った場合はシンボル判定は誤まり、誤判定シンボルとの等化誤差が算出される。しかし、いずれの場合も等化誤差 $e(n)$ が最少信号間距離内 ($\pm\delta$) に分布することになるので、誤差量の絶対値 $|e(n)|$ は δ より大きな値とはならない。一方、図 2 に示すよう最外周シンボルの外側に等化器出力が位置した場合、 $|e(n)|$ が δ よりも大きくなることもある。さまざまな箇所です送電線路の SNR (Signal Noise Ratio) を測定したところ、平均 SNR は約 35 dB であった。文献(2)より平均 SNR が 35 dB の時の最外周シンボルの BER は無視できるほど小さいと推定される。このことは $|e(n)| > \delta$ となる確率は熱雑音の場合には無視できるほど小さいことを表している。従って、 $|e(n)| > \delta$ となった場合はサージ雑音が印加されたものと見なせる。

〈3・2〉 発散防止法 等化誤差の絶対値 $|e(n)|$ が最小信号間距離 δ を超えた場合、以下の処理を行う。

① (1) 式のステップサイズパラメータ μ をゼロに設定し、

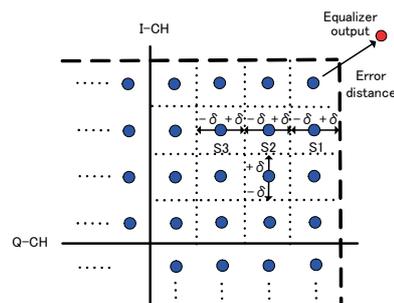


Fig. 2. 64QAM symbols and equalizer output.

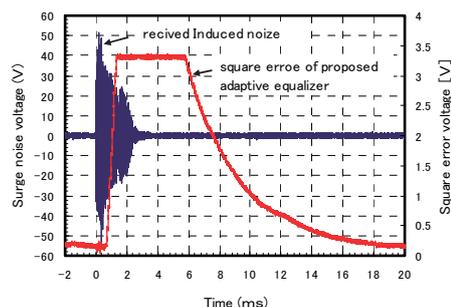


Fig. 3. Square error performance of proposed adaptive equalizer.

更新を停止して現在のタップ係数 $\mathbf{w}(n)$ を保持する。

② $|e(n)| > \delta$ であることを検知している場合は処理を継続する。その後、 $|e(n)| < \delta$ であることを検知した場合は、以下の処理を行う。

③ (1) 式のステップサイズパラメータ μ をトラッキングモード時の係数値に再設定し、保持していたタップ係数値 $\mathbf{w}(n)$ から更新を再開する。

以上のように、筆者らが提案した方法は簡易な手順ながら適応等化器の発散防止を可能としている。

4. 試験結果

提案した発散防止法を導入した適応等化器により、図 1 と同一のサージ雑音を印加したときの適応等化器の動作試験を行った。図 3 に等化誤差の実効値を示す。図 3 より、提案法を用いれば、サージ雑音が印加された時でも適応等化器タップ係数の発散を防止でき、また、トラッキングモードではタップ係数が収束していることが分かる。また、熱雑音印加時の BER 試験により、提案発散防止法を導入した適応等化器では理論値に近い BER 特性が得られることも確認した。

5. むすび

本論文では送電線デジタル電力線搬送方式で用いる適応等化器について、サージ雑音によるタップ係数の発散を防止する方法を提案し、その有効性を実験で確認した。

文 献

- (1) 佐々木範雄・清野賢一・花海 丞・織田健志・安達文幸:「送電線路を用いるデジタル伝送のチャンネルモデル化」, 電学論 C, Vol.132, No.8, pp.1317-1327 (2012)
- (2) 佐々木範雄・花海 丞・織田健志・安達文幸:「送電線用デジタル電力線搬送における適応等化器」, 電学論 C, Vol.134, No.2, pp.258-266 (2014)
- (3) 佐々木範雄・花海 丞・織田健志・安達文幸:「送電線デジタル電力線搬送に用いる適応等化器のトレーニング符号」, 電学通信研資, CMN-14-062, pp.21-25 (2014)