

地中無線通信システムのための誤り訂正符号の評価

大原 衛^{*1)} 山口 隆志^{*1)} 大平 倫宏^{*1)} 佐藤 研^{*2)}

遠藤 真一^{*3)} 遠目塚 良一^{*3)} 多田 篤毅^{*3)} 木村 象二郎^{*3)}

Evaluation of error correction codes for an underground wireless communication system

Mamoru Ohara^{*1)}, Takashi Yamaguchi^{*1)}, Norihiro Ohira^{*1)}, Ken Sato^{*2)},
Shinichi Endo^{*3)}, Ryoichi Tohmetsuka^{*3)}, Atsuki Tada^{*3)}, Shojiro Kimura^{*3)}

キーワード：誤り訂正符号, Reed-Solomon 符号, 畳込み符号, Viterbi 復号

Keywords: Error correction codes, Reed-Solomon code, Convolutional code, Viterbi decoding

1. まえがき

土砂災害による被害を最小限に抑えたり, ダムの決壊や空港の地盤沈下による事故を未然に防いだりするためには, 周囲の地中や水中の環境変化を常に計測し監視することが重要である。これらの環境に計測機器を設置する際には, 多くの場合, 無線による通信が必要である。しかし, 高周波領域の電磁波は, 地中や水中を進むにつれてすぐに減衰してしまう。このため, 坂田電機株式会社では, 低周波境界を利用することによって, 地中にある計測機器との無線通信を可能としている⁽¹⁾。この地中無線通信システムには, 通信可能距離の延伸に関する強い顧客要望がある。本研究では, この地中通信システムの通信可能距離の延伸を目指し, いくつかの誤り訂正符号の評価を行った。

2. 地中無線通信システムの通信特性



図1. 地中無線通信システムの送信機

現行の地中無線通信システムの送信機を図1に示す。これらは, 圧力計などのセンサを搭載し, 土中または水中に埋設されて定期的に計測と通信を行う。一度埋設されると, バッテリー交換などのメンテナンスを行うのは困難であるため, 計測と通信は必要最低限の頻度で行わなければならない。これらは, あらかじめ決められた時刻に行われる。また, ソフトウェアの暴走などによるバッテリー

の浪費を防ぐため, 通信開始後一定時間が経過すると, 強制的に通信を中断するタイマ機能が内蔵されている。

本システム的应用では, 数十バイト程度の比較的小さな計測データを, 1日あるいは1週間などの単位でまとめて送信することが多い。また, 応用によって送信機に搭載されるセンサ数などが異なり, 一度に送信するデータ数も異なる。このため, 比較的少量のデータを単位として誤り訂正を行う方が, 多くの応用に対して適用しやすい。

3. 誤り訂正符号の評価

線形誤り訂正符号は, アプリケーションが送出する k ビットの情報に対して, r ビットの検査ビットを付加する。これらの和 $n = k + r$ を符号長と呼ぶ。また, $R = k/n$ を符号化率と呼ぶ。一般に符号化率が低いほど多くの通信路誤りを訂正できるが⁽¹⁾, 実効的な通信速度が低下する。前述したように, 地中無線通信システムではバッテリーの浪費を防ぐためのタイマが存在するため, 通信を一定時間内に完了する必要がある。本研究では, これまでの地中無線通信システムの運用経験から1回あたりの最大通信量を見積もり, これを符号化したものが所定の時間内に送信できるよう仕様を検討した。この結果, 符号化率 R が $2/3$ 以上となるような誤り訂正符号について評価を行った。

3.1 Reed-Solomon 符号と畳込み符号の比較 本研究では, 代表的なブロック符号のひとつで CD の誤り訂正などに用いられている Reed-Solomon 符号⁽²⁾⁻⁽⁵⁾と, 衛星通信などで利用される Viterbi 復号アルゴリズムを用いた畳込み符号⁽⁶⁾⁽⁷⁾について, 誤り訂正能力の評価を行った。数値解析ソフト MATLAB を用いたモンテカルロ・シミュレーションによって, 各符号を用いた際の復号後受信率 (Post Re-construction Receiving Rate: PRRR) を見積もった。

*1) 情報技術グループ
*2) 電子・機械グループ
*3) 坂田電機株式会社

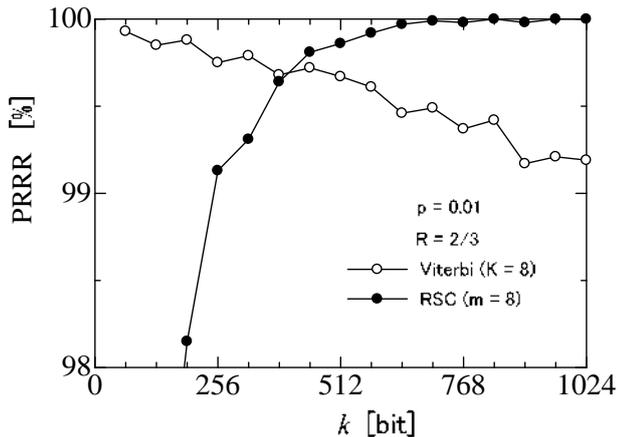


図2. Reed-Solomon 符号と畳込み符号の比較
RSC: Reed-Solomon 符号, Viterbi: 畳込み符号
ビットあたり誤り発生率 p , 符号化率 R

図2は符号化率を $R=2/3$ と固定し、情報ビット数を変化させた時の各符号の PRRR を比較したものである。ビットあたり誤り発生率は、 $p=0.01$ とした。また、畳込み符号化では、 $R=1/2$ の符号を生成した後に、半分の検査ビットを送信せずに廃棄するパンクチャと呼ばれる手法を用いて $R=2/3$ の符号を得た。図から、Reed-Solomon 符号では符号長が長いほど誤り訂正能力が高く、反対に畳込み符号は符号長が短いほど訂正能力が高いことが分かる。これは、Reed-Solomon 符号が代数的な手法で復号されるのに対して、Viterbi アルゴリズムは受信した系列にもっとも近い符号語を推定する最尤復号手法であり、符号長が長いほど受信系列の推定を誤る可能性が大きくなるためと思われる。

上述のように、地中無線通信システムで送受信される計測データの系列は、応用によってその量が大きく異なる。一般に、誤り訂正符号は符号長や拘束長が長いほど訂正能力が高くなりうるが⁽⁸⁾、送信すべきデータが少量である場合には非効率である。このため本研究では、数十バイト程度の比較的短い符号長を採用することとした。図2に示したように、この符号長では畳込み符号の方が訂正能力が高い。以下では、畳込み符号についてさらに検討する。

3.2 軟判定の評価 次に、軟判定を行った際の誤り訂正能力について評価を行った。通常、デジタル通信の受信部では、アナログの受信信号を0または1からなるデジタル系列に変換し、この系列に対して復号処理を行う⁽⁹⁾。このような手法を硬判定という。これに対して、受信系列のデジタル変換と復号処理を同時に行なう手法を軟判定と呼ぶ⁽³⁾。符号化されたデータの受信では、受信系列は何らかの符号語であるはずである。この知識をデジタル変換の際にも用いることで、誤り訂正能力を向上できる。

図3は、誤り訂正を行わない場合、畳込み符号を硬判定した場合 (Hard)、軟判定した場合 (Soft) の誤り訂正能力の比較が示されている。軟判定は硬判定よりも高い誤り訂正を示し、誤り訂正を行わない場合に比べて約 8dB 程度の

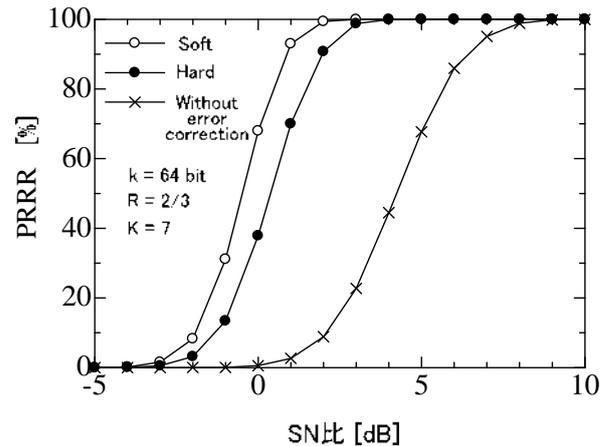


図3. 硬判定と軟判定の比較
Soft: 軟判定, Hard: 硬判定
ビットあたり誤り発生率 p , 符号化率 R , 拘束長 K

符号化利得が得られている。

4. まとめ

本研究では、地中無線通信システムの通信可能距離の延伸を目的として誤り訂正符号の評価を行った。Reed-Solomon 符号と畳込み符号 (Viterbi 復号) について MATLAB を用いてモンテカルロ・シミュレーションを行い、各符号の PRRR を見積もった。この結果、地中無線通信システムに適した符号方式として、畳込み符号を選択した。また、軟判定を用いることで畳込み符号の誤り訂正能力を向上できることも確認した。

本研究で作成した符号のシミュレーションプログラムは、坂田電機が開発した通信路シミュレータと統合され、次期の地中無線通信システムの製品開発に応用される。

(平成22年6月30日受付, 平成22年8月26日再受付)

文 献

- (1) 遠目塚他: 「無線による地中無線通信システムの開発」, 最近の地盤計測技術に関するシンポジウム, pp. 21-26
- (2) G. C. Clark, Jr., and J. B. Cain: Error-Correction Coding for Digital Communications, Plenum Press (1981)
- (3) 島村徹也: デジタル通信システムのための MATLAB プログラム事例解説, トリケップス (2000)
- (4) 神谷幸宏: MATLAB によるデジタル無線通信技術, コロナ社 (2008)
- (5) 江藤良純, 金子敏信: 誤り訂正符号とその応用, オーム社 (1996)
- (6) R. Johannesson and K. Sh. Zigangirov: Fundamentals of Convolutional Coding, IEEE Press (1999)
- (7) 八嶋幸幸: 畳込み符号と Viterbi 復号, トリケップス (2008)
- (8) 宮川洋, 岩垂好裕, 今井秀樹: 符号理論, pp. 386-387, 電子情報通信学会 (2001)
- (9) 大友功, 小園茂, 熊澤弘之: ワイヤレス通信工学, コロナ社 (2002)