

ネットワーク・誤り訂正融合符号を用いた高信頼かつ省電力無線通信の研究

代表研究者

石井 光 治

香川大学 工学部 講師

1 研究の背景・目的

東日本大地震をきっかけに電気・ガス・水道などのライフラインのほかに我々の生活に必要な不可欠なものに、情報通信があることを改めて思い知らされた。また昨今の慢性的な電力不足から、現在の情報通信に用いられている莫大な消費電力の省電力化が必要不可欠である。さらに、自然災害などの事前予測の重要性が再確認され、数十年単位で稼働可能なセンサネットワークが必要であり、それを実現するために省電力な通信技術の構築が必要不可欠である。このように従来の高速かつ大容量な通信の実現から省電力かつロバストな通信の実現の重要性が高まってきた。省電力な無線通信を実現するためには、ネットワークトポロジに応じて効率的に通信を行う必要があり、それを実現する一つの手法にネットワーク符号化技術があげられる。しかし従来のネットワーク符号化技術は有線通信などの誤りのない環境下における設計であるため、誤りが発生しやすい無線通信環境には不向きであった。

本研究は、ネットワーク符号化の概念を取り入れた誤り訂正符号化を行うことで強力な誤り訂正能力を併せ持つネットワーク符号を設計し、無線通信技術に応用することで高信頼かつ省電力な無線通信を設計することを目的とする。これにより、地球に、人に優しいユビキタス情報社会の実現に必要な不可欠な無線通信技術の構築に大きく貢献できると考えられる。

2 想定するシステムモデルと本研究の問題設定

本研究で想定するシステムモデルを図1に示す。2台の送信端末 T_1 、 T_2 が K 個のリレー端末の協力を得て互いに情報を伝送するシステムを考える。送信端末 T_1 からリレー端末 k へのチャネル応答値を f_k とし、送信端末 T_2 からリレー端末 k へのチャネル応答値を g_k とする。また、上りと下りでのチャネル応答値は等しいと仮定する。さらに受信側ではチャネル推定は完璧とし、送信側は未知と仮定する。通信プロトコルは2フェーズプロトコルで構成し、第1フェーズで各送信端末が同時に自身の情報をリレー端末に送信する。第2フェーズで各リレーが受信した信号を基に送信信号を生成し、その信号を各送信端末にブロードキャストを行う。第1フェーズでリレー端末 k が受信する信号は以下となる。

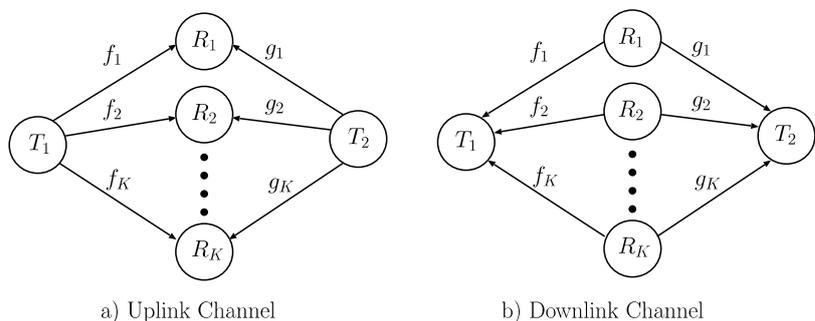


図 1 想定する Two-way 通信路

ここで x_1 、 x_2 はそれぞれ平均電力 P_1 、 P_2 の送信信号であり、 n_k はリレー端末 k における白色複素ガウス雑音であり平均 0、分散 N_k とする。本研究では、受信した信号を用いていかに効率的に情報を転送する信号を生成し、復号するかを問題として設定する。協力通信では、一般的に DF (Decode-and-Forward) プロトコルや AF (Amplify-and-Forward) プロトコルがある [1]。DF プロトコルでは、それぞれ受信した信号から送信した信号を復号し、再符号化をして転送する。AF プロトコルでは、受信した信号を増幅させて転送する方式が提案されている。本研究で着目しているモデル (2-way Relay 通信路) では、2つの端末から同時に信号を受信しているため、各送信端末が送信した信号を別々に推定した場合にその推定制度が著しく劣化する。そのため推定精度の悪い情報を用いて再符号化する DF は本方式には不向きである。また、AF プロトコルは受信した信号を増幅されて転送するため、受信信号のダイナミックレンジが大きくなりアンプの負担が増えるが、本

$$y_k = f_k x_1 + g_k x_2 + n_k \quad (1)$$

ここで x_1 、 x_2 はそれぞれ平均電力 P_1 、 P_2 の送信信号であり、 n_k はリレー端末 k における白色複素ガウス雑音であり平均 0、分散 N_k とする。本研究では、受信した信号を用いていかに効率的に情報を転送する信号を生成し、復号するかを問題として設定する。協力通信では、一般的に DF (Decode-and-Forward) プロトコルや AF (Amplify-and-Forward) プロトコルがある [1]。DF プロトコルでは、それぞれ受信した信号から送信した信号を復号し、再符号化をして転送する。AF プロトコルでは、受信した信号を増幅させて転送する方式が提案されている。本研究で着目しているモデル (2-way Relay 通信路) では、2つの端末から同時に信号を受信しているため、各送信端末が送信した信号を別々に推定した場合にその推定制度が著しく劣化する。そのため推定精度の悪い情報を用いて再符号化する DF は本方式には不向きである。また、AF プロトコルは受信した信号を増幅されて転送するため、受信信号のダイナミックレンジが大きくなりアンプの負担が増えるが、本

システムにおいて性能の面で利点があるため一般的に利用されている[2]。

本研究では、近年提案された Compute-and-Forward プロトコル[3]の考えを基に、受信した信号を直接的に用いて転送する情報を生成する。具体的には受信した信号からいかに効率的に転送する信号系列を生成できるかという問題に対して、ソフトインプット、ソフトアウトプット(SISO)符号器を用いて符号理論的にシステムを設計する。

2 ソフトインプットソフトアウトプット(SISO)符号器

2-1 One-way 通信路における SISO

ここでは共同研究者が文献[3]で提案されている One-way 通信路における SISO 符号化について説明する。One-way 通信路は、本研究で着目している Two-way 通信路と異なりリレーで受信される信号成分に干渉成分が存在せず、転送する情報成分と雑音成分の2つで構成されている。そこで各リレー端末は以下のように受信信号の事後確率から送信された信号の期待値を復元することが可能である。

$$\tilde{x} = \Pr(\hat{x} = 1|y) - \Pr(\hat{x} = -1|y) \quad (2)$$

ここで \tilde{x} は送信端末が送信した BPSK 信号の期待値であり、 \hat{x} はリレー端末が推定した送信信号である。式(2)のように受信した信号から送信された信号のレプリカ (Soft-Symbol Estimation: SSE) を推定し、これを転送することで DF プロトコルと AF プロトコルの両性質も持ち合わせた転送が可能となる[5, 6]。文献[3]では、さらにこの軟値を用いて符号化を行う。この符号器のことを SISO 符号器と呼ぶ。ここで例として畳込み符号を用いた SISO 符号について説明する。いま符号生成行列が [7]₈ として与えられたとする。従来の (0, 1) のバイナリ信号を入力とする) 符号のある時点 t の符号出力は以下となる。

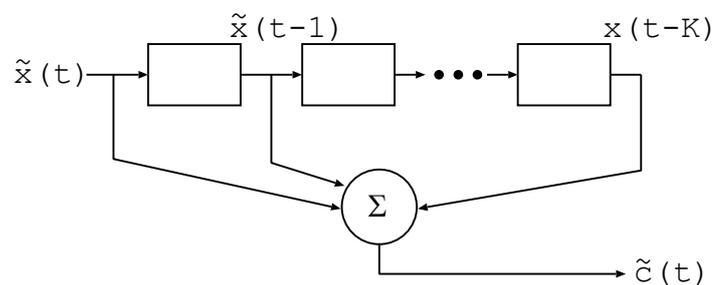


図 2 SISO 符号器

$$c(t) = b(t) \oplus b(t-1) \oplus b(t-2) \quad (3)$$

OPLUS は GF(2) 上の和であり、XOR である。各入力信号の期待値が与えられたときに、計算される符号語系列を考える。符号語はトレリス線図上で考えた場合、各状態に存在する確率と入力の確率の積により符号語の 0、もしくは 1 の確率を計算することが可能である。具体的には軟出力符号語の信号は以下で与えられる。

$$\tilde{c}(t) = \tilde{x}(t)\tilde{x}(t-1)\tilde{x}(t-2) \quad (4)$$

以上のように SISO 符号器を用いて軟値を転送することが可能である。さらに複数のリレー端末を用いる場合は、各リレー端末に割り当てられる符号を軟入力の入力信頼度に応じて変えることで、システム全体で最適な符号として設計することが可能である。

2-2 Two-way 通信路における SISO 符号器

ここでは、Two-way 通信路における SISO 符号器について説明する。各リレー端末は One-way 通信路の場合と異なり、2 つの送信端末の信号を同時に転送する必要がある。しかし、各送信端末から送信された信号を個々に推定し、SISO 符号化すると推定精度が著しく劣化する。しかし符号設計の観点から見ると、信頼度の高い SSE には符号重みの大きい符号を割り当てる必要がある[3]。そのため、推定精度の劣化と符号化利得の最適化のトレードオフを考慮して設計する必要がある。

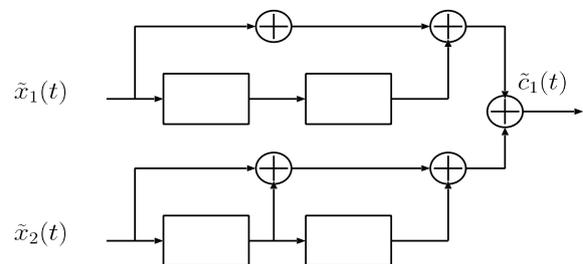


図 3 S1 と S2 の SSE を用いた SISO 符号器

そこで最初に 2 入力 1 出力の SISO 符号器について説明する。符号化率としては 2 となるが、2 つ以上存在するリレー端末が協力するためシステム全体で符号化率が 1 を超えず、結果として復号可能である。例として、T1 の信号を [5]₈ で符号化し、T2 の信号を [7]₈ で符号化し、それらを合成する符号器を用いた場合の SISO 符号

器は図3の構成を持ち、その軟出力は以下となる。

$$\tilde{c}(t) = \tilde{x}_1(t)\tilde{x}_1(t-1)\tilde{x}_1(t-2)\tilde{x}_2(t)\tilde{x}_2(t-2) \quad (5)$$

つまり、複素信号領域の積として表すことができる。先述の通り、リレー端末では2つの信号をそれぞれ分離して復号する場合、互いの信号が干渉となるため復号の信頼度が低い。つまり、SISO 符号器に入力される軟値の値が小さくなる問題点がある。そこで新たな信号として b_3 を以下のように定義する。

$$b_3 = b_1(t) \oplus b_2(t) \quad (6)$$

b_3 を BPSK 変調した信号を x_3 とする。各送信端末は BPSK 信号を用いているため、 $(x_1, x_2) = (+1, +1), (-1, -1)$ の場合は $x_3 = 1$ となり、 $(x_1, x_2) = (+1, -1), (-1, +1)$ の場合は $x_3 = -1$ となる。リレー端末では、受信する4つの組の信号を2つの信号として見なして推定することが可能である。この場合は各送信信号を推定する場合に比べて推定精度が大幅に改善することが可能である。ここでは以下の3通りの符号化について検討する。1) 各送信信号の推定値を用いて SISO 符号化する。2) 合成語の信号 x_3 を用いて SISO 符号化する。3) 各送信信号と合成後の信号を用いて SISO 符号化する。1) に関しては式(5)で説明した通り、それぞれの軟値を用いて符号化する。2) の SISO 符号では、リレー端末で合成語の信号の SSE のみを使用するため、各送信端末からの信号をそれぞれ別の符号化を行うことができない。しかし、合成後の信号推定はそれぞれ別々に推定する場合に比べて信頼度が高いという特徴を持つ。3) の SISO 符号化ではそれぞれ別の符号化を行うことが可能であるが、同じ時点の情報成分が含まれる場合のみ、その成分を合成後の信号に置き換える。例として、式(5)で与えられた符号器構成は図4となり、その出力は以下のように与えられる。

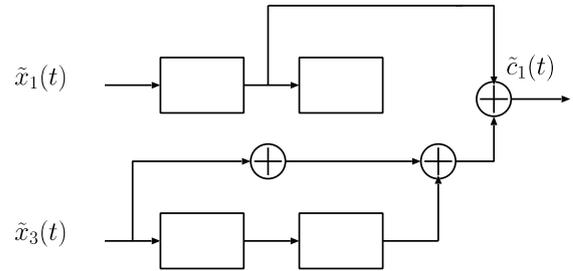


図4 S1, S2, S3 の SSE を用いた SISO 符号器

$$\tilde{c}(t) = \tilde{x}_3(t)\tilde{x}_1(t-1)\tilde{x}_3(t) \quad (7)$$

特徴として、合成後の信号の推定値と分離推定した信号の推定値が混在する。これにより、[3]で提案されているように、信頼度の高い推定値に符号重みの大きい符号を割り当てることが可能である。

3 特性解析とシステム設計方法

3-1 誤り率解析

理論解析を行うため、SISO 符号器への入力を再定義する。各送信端末から送信された信号の軟値は式(2)のように定義されており、以下のように表すことが可能である。

$$\tilde{x}_i(t) = \Pr(\hat{x}_i = +1|y) - \Pr(\hat{x}_i = -1|y) = \alpha_{in}x_i(t) + n_{in}(t) \quad (8)$$

i は送信端末番号を表し、3 の場合は各送信情報の XOR 合成した情報に対する SSE である。(8)より、SSE の平均は α_{in} となり、式(9)で表される。また n_{in} の確率密度関数はガウス分布とはならないが、解析のため平均0のガウス分布に従うと仮定し、その分散は式(10)となる。

$$\begin{aligned} \alpha_{in} &= 1 - \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \tilde{w}_{in} \\ &= 1 - \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l |x_{c'_3}(k) - x_{c_3^*}(k)| \\ &= 1 - \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (1 - x_{c'_3}(k)x_{c_3^*}(k)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sigma_{\tilde{w}_{in}}^2 = E[(\tilde{w}_{in} - \mu_{\tilde{w}_{in}})^2] = E\left[\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (1 - x_{c_3'}(k)x_{c_3^*}(k) - \mu_{\tilde{w}_{in}})^2\right] \quad (10)$$

ここで l は送信された信号の長さである。SISO 符号器への入力 SSE が与えられた場合、出力の軟値は以下となる。

$$\tilde{c}(t) = \alpha_{out}c(t) + n_{out} \quad (11)$$

$c(t)$ は各送信端末が送った情報を基に、リレー端末で正しく符号が生成された場合の符号語である。また、 α_{out} 、 n_{out} はそれぞれ以下のようになる。

$$\alpha_{out} = \alpha_{out}^d \quad (12)$$

$$\sigma_{out} = (\alpha_{in}^2 + \sigma_{in}^2)^d - \alpha_{in}^{2d} \quad (13)$$

d は符号の重みであり、[7]8 であれば $d=3$ となり [5]8 であれば $d=2$ となる。リレーでは符号化した信号を送信電力が P_r となるように正規化して送る。そのときの正規化係数は以下で与えられる。

$$\beta = \sqrt{\frac{P_r}{(\alpha_{in}^2 + \sigma_{in}^2)^d}} \quad (14)$$

これより受信端末 1、2 のリレー端末 k からの受信信号はそれぞれ以下で与えられる。

$$\begin{aligned} y_{k1}(t) &= f_k \beta_k (\alpha_{out,k} x_c(t) + n_{out,k}) + n_{k1} \\ &= f_k \beta_k \alpha_{out,k} x_c(t) + f_k \beta_k n_{out,k} + n_{k1} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} y_{k2}(t) &= g_k \beta_k (\alpha_{out,k} x_c(t) + n_{out,k}) + n_{k2} \\ &= g_k \beta_k \alpha_{out,k} x_c(t) + g_k \beta_k n_{out,k} + n_{k2} \end{aligned} \quad (16)$$

n_{k1} 、 n_{k2} はそれぞれ受信端末 1、2 における複素雑音成分であり、それぞれ平均 0、分散 σ_{n1}^2 、 σ_{n2}^2 とする。式 (15) (16) から分かるように、リレー端末から出力される信号の不確定要素に起因する雑音と受信側で発生する雑音の和が雑音として加算される。以下、受信端末 1、2 で受信される成分はチャンネル応答値の g と f 、また受信側で発生する雑音の分散のみが異なるため、受信端末を T_2 として説明する。リレー端末 k から受信端末 T_2 までの受信 SNR は以下となる。

$$\gamma_{k2} = \frac{|g_k|^2 \frac{P_r}{\alpha_k^2 + \sigma_{out,k}^2} \alpha_k^2}{\sigma_2^2 + |g_k|^2 \frac{P_r}{\alpha_k + \sigma_{out,k}^2}} \quad (17)$$

畳込み符号の誤り率特性解析を応用すると、受信端末 2 における誤り率 P_2 は以下と近似できる [7]。

$$P_2 \approx B_{d_{free}} \exp\left(-\sum_{k=1}^K d_{k,s_1} \gamma_{k2}\right) \quad (18)$$

これより、受信端末 1 の誤り率も同様に求めることができる。

先述の通り、Two-way チャネルの場合では SISO 符号化方法が入力の情報に依り 3 パターン存在する。それらを解析するために、以下で一般化した SISO 符号器出力に関して述べる。 d_1 、 d_2 、 d_3 をそれぞれ送信端末 1、2 への割り当てる符号の重み、各送信端末から送られる情報の XOR 合成された情報に割り当てる符号の重みを表す。例として、送信端末 1 の情報を [7]8 で符号化し (重み 3)、送信端末 2 の情報を [5]8 (重み 2) で符号化する場合を例に説明する。リレー端末において各送信端末が送った情報の事後確率をそれぞれ別に利用して符号化する場合 (符号器構成 1 の場合)、 $(d_1, d_2, d_3) = (3, 2, 0)$ となる。またリレーにおいて各送信端末の事後確率と各送信端末の情報を XOR した情報に対する事後確率を用いて符号化を行う場合 (符号器構成 3 の場合)、 $(d_1, d_2, d_3) = (1, 0, 2)$ となる。これは送信端末 1 の情報成分は d_1 に 1 つ d_3 に 2 つ入るため、結果として [7]8 という符号を形成し、送信端末 2 の情報成分には d_3 に送信端末 1 と合成された形で 2 つ入っているからである。XOR した情報に対する事後確率のみを用いる場合は送信端末 1、2 に別の符号器を割り当てるこ

とは出来ない。以下に一般化した SISO 符号器出力を示す。

$$x_k = (\alpha_{k,s_1}^{d_{k,s_1}} x_{k,s_1} + n_{out,s_1})(\alpha_{k,s_2}^{d_{k,s_2}} x_{k,s_2} + n_{out,s_2})(\alpha_{k,s_3}^{d_{k,s_3}} x_{k,s_3} + n_{out,s_3}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} &= \prod_{i=1}^3 \alpha_{k,s_i}^{d_{k,s_i}} x_{k,s_i} + n_{out,s_i} \\ &= \alpha_k x_k + n_k \end{aligned} \quad (20)$$

$$\alpha_k = \prod_{i=1}^3 \alpha_{k,i}$$

$$\begin{aligned} \sigma_k^2 &= E[|n_k|^2] \\ &= \prod_{i=1}^3 ((\alpha_{k,i}^{d_{k,i}})^2 + \sigma_{out_{k,i}}^2) - \prod_{i=1}^3 ((\alpha_{k,i}^{d_{k,i}})^2) \end{aligned} \quad (20)$$

式(19)の右辺第1項は送信端末1の事後確率を用いた SISO 符号器の出力であり、第2項は送信端末2の事後確率のみを用いた SISO 符号器の出力であり、第3項は送信端末1、2の情報を XOR 合成した情報に対して SISO 符号化を行った場合の出力である。

3-2 符号設計

本章では、符号の設計に関して述べる。一般に最適な畳込み符号は、符号化率、拘束長が与えられた場合に既に解析されている。例えば符号化率 1/2 で拘束長が 3 の場合の最適とされている畳込み符号は [7, 5]₈ とされている。本研究では、リレー端末が 2 の場合においては各リレー端末が [7]₈、[5]₈ と符号化することで分散符号化を実現している。しかし、どのリレー端末がどの符号を利用するのかにより特性が異なるため、本章では符号の割当に関して設計する。例として協力リレー端末数を 2 と 4 の場合について設計する。その場合の符号化率は 1/2、1/4 に相当し、最適な畳込み符号を表 1 に示す。

表 1 最適畳込み符号の符号化率と各要素の重み

Rate	Memory length	g1	d1	g2	d2	g3	d3	g4	d4
1/2	3	5	2	7	3				
1/2	4	15	3	17	4				
1/2	5	25	3	35	4				
1/4	3	5	2	7	3	7	3	7	3
1/4	4	13	3	15	3	15	3	17	4
1/4	5	25	3	27	4	33	4	37	5

ここで理論誤り率の式(18)に着目すると、リレー端末での SISO 符号器からの出力符号語の SNR が高い符号語、言い換えると SISO 符号器へ入力される信号の信頼度が高い情報に重みの大きい符号を割り当てると誤り率特性を向上させることが可能であることがわかる。その結果、1)各送信端末からの送信情報を個別に用いる場合は、各リレー端末で受信した SNR を基に SNR が高いリレー端末が最も重みの高い符号を割り当てることが最適となる。例えば、リレー端末1で計算された SSE の SNR が 10 [dB]とし、リレー端末2で計算された SSE の SNR が 20 [dB]とした場合、リレー端末2の方が受信 SNR、または SISO 符号器から出力される SNR はリレー端末1のそれらより高い。そのため、リレー端末2では符号 [7]₈ を用いて、リレー端末2では [5]₈ を用いて符号化を行うことが最適となる。これらより、受信 SNR の大きさリレー端末の順に符号の重み(d)の高い符号を割り当てることがシステム全体として特性を最も効率的に向上させることが可能となる。

4 性能評価

本章では、提案する分散 SISO 符号化協力 2-way 通信システムの特性に関して、フレーム誤り率(FER)を用いて評価する。1 フレームは 130 ビットで構成されている。受信側でのチャネル推定は完璧とし、送信側では未知とする。第2フェーズにおいて各リレー端末は時分割で受信端末にブロードキャストを行う。最初にリレー端末数が 2 の場合における特性を評価する。また、各通信路の平均 SNR はすべて等しいと仮定する。システム全体の総送信電力は等しいと仮定しており、マルチプルアクセス(第1)フェーズ、ブロードキャスト(第2)フェーズで等しい電力を使い、各送信端末が等しい電力配分を用いた。これは等電力配分にすることで特性が最も良くなることが知られているためである[6]。つまり、リレー端末数が 2 の場合では、送信端末、リレー端末がそれぞれ P/4 (P は総送信電力)の電力を用いる。リレー端末が 4 の場合は、送信端末はリレ

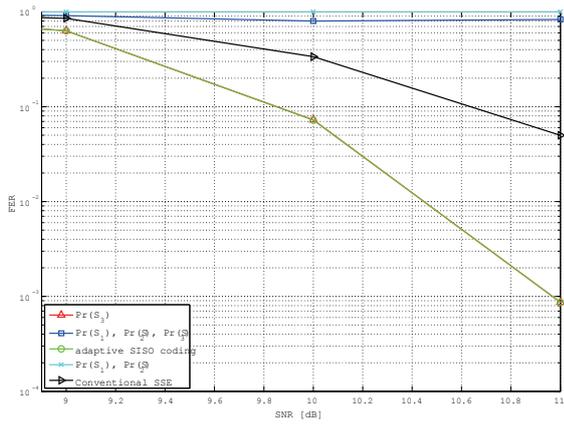


図 5 リレーの数が 2、AWGN 通信路における入力の種類に対する SISO 符号の特性

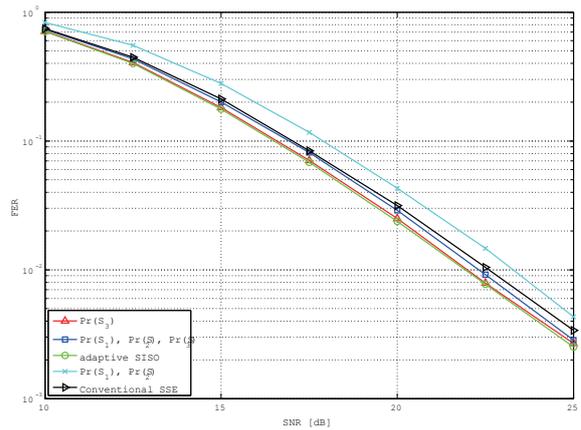


図 6 リレーの数が 2、Fading 通信路における入力の種類に対する SISO 符号の特性

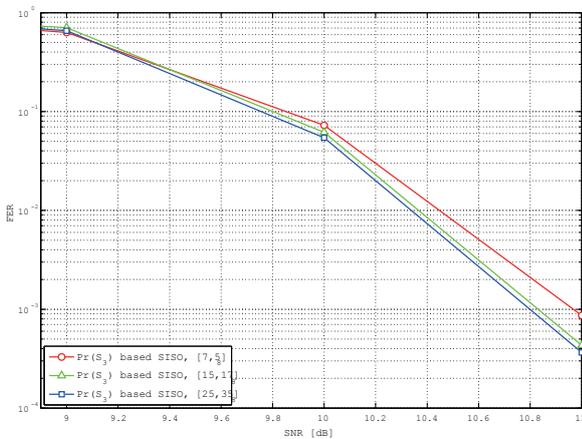


図 7 リレーの数が 2、AWGN 通信路における畳込み符号の種類による SISO 符号の特性 (Pr(s3)を使った SISO)

一端末数が 2 の場合と同様に $P/4$ ずつ電力を使用し、各リレー端末は $P/8$ の電力を使用する。リレー端末数が 2 の場合の符号構成は $[7, 5]_8$ を用いた。図 5 に AWGN 通信路における FER 特性、図 6 にフェーディング通信路における特性を示す。比較対象として SISO 符号化を行わないで SSE 値を転送し、受信側では最大比合成を行うシステムを従来方式とした [5]。転送する情報は、各送信端末の情報を XOR 合成した信号の尤度を基に計算された SSE の値とする。図 5、6 から従来方式と比較して提案する手法では符号化利得が得られていることがわかる。しかし、AWGN 通信路において $Pr(s_1)$ 、 $Pr(s_2)$ を別々に用いる方式では誤り率が劣化する。この理由として、AWGN 通信路では 2 つの送信端末が +1 と -1 または -1 と +1 を送信した場合にリレー端末の受信信号が 0 (受信側の雑音を無視した場合) となる。その結果、リレー端末では正しく復号することができない。その不確実性を含む入力を用いて SISO 符号化する場合は、効果がないことが分かる。しかし、図 6 からはフェーディング通信路の場合、各通信路固有の変動の影響でどの方式も通信が可能となっている。図 6 から各

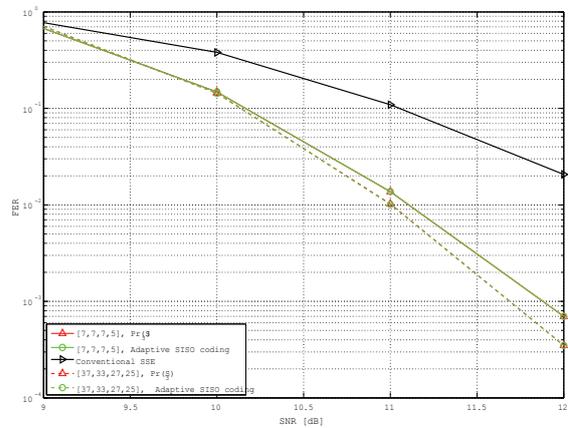


図 7 リレーの数が 4、AWGN 通信路における符号の種類に対する SISO 符号の特性

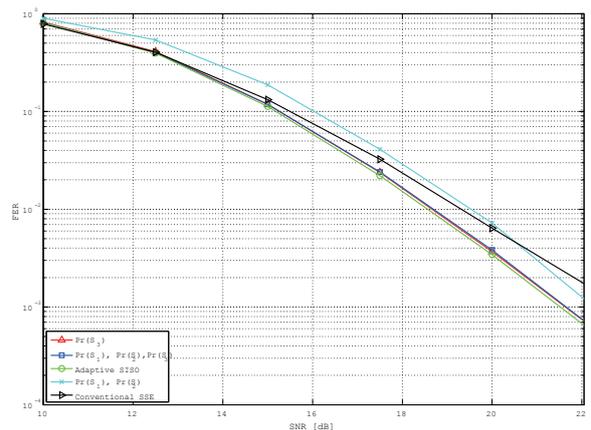


図 9 リレーの数が 4、Fading 通信路における入力の種類に対する SISO 符号の特性

送信端末の情報を XOR 合成した情報を用いて SISO 符号化転送を行った場合が最も特性が良い。これは、リレー端末において各送信端末の情報の事後確率の信頼度が低いいため、その結果 SISO 符号器の出力の SNR が低減したと考えられる。また $Pr(s_1)$ 、 $Pr(s_2)$ 、 $Pr(s_3)$ を用いた SISO 符号化では、信頼度の高い入力 SNR に対しては符号重みの大きい符号を割り当てることが可能となり、かつ $Pr(s_3)$ を用いて入力信頼度の低減を確保している。従来の無符号化と比べると、特性を改善させることがわかる。しかし、 $Pr(s_1)$ 、 $Pr(s_2)$ の信頼度が低いいため、符号割当が最適でも全体の特性は $Pr(s_3)$ のみを用いた場合と比較すると特性が劣化している。つまり、最適符号の割当による利得より、干渉チャネルから推定する信号の信頼度の劣化が大きい。

つぎに拘束長を長くした場合の特性について示す。図 7 に拘束長 3、4、5 の場合の符号、具体的には [7, 5]₈、[15, 17]₈、[25, 35]₈ の符号を利用した場合の特性を示す。符号化利得の評価であるため、通信路は AWGN 通信路を用いる。また SISO 符号化方法は、各送信端末の情報を XOR 合成した情報を用いる符号を利用した。図 7 から分かるように、拘束長が長くなると符号化利得が増大するため、特性が改善することがわかる。これは本報告書では割愛するが、 $Pr(s_1)$ 、 $Pr(s_2)$ を使った SISO の場合でも、 $Pr(s_1)$ 、 $Pr(s_2)$ 、 $Pr(s_3)$ を使った SISO の場合でも同様の傾向がある。それより、符号化利得は従来の符号と同様に拘束長が長く（最小自由距離が長く）なると符号化利得も増大することがわかる。

つぎにリレー端末数が 4 の場合について評価する。リレー端末数が 2 の場合と同様に AWGN 通信路における比較評価とフェーディング通信路における比較評価を行う。分散協力 SISO 通信システムの符号化率はリレー端末数が 4 のため全体の符号化率は $1/4$ となり、用いた符号は、表 1 の符号を用いた。図 8 に AWGN 通信路における評価、図 9 にフェーディング通信路における評価をそれぞれ示す。図 8 では符号の拘束長が 3 の場合と 5 の場合を比較する。リレー端末数が 2 の場合と同様に、拘束長が長くなると符号化利得が大きくなるため、特性が改善する。図 9 では、提案する各 SISO 符号器を用いた場合の評価を行う。リレー端末数が 2 の場合と同様に、各送信端末の情報を分離して確率を求めそれを利用する場合は特性が従来方式と比べて劣化する。その理由として、干渉チャネルから各信号の事後確率を求める場合、その信頼度が低くなり、それを入力とする結果として特性が劣化する。しかし、提案する各送信信号の XOR した信号に対して尤度を計算し、それを用いて SISO 符号化転送を行う方式を用いると、無符号化の場合に比べて符号化利得を有効に得ることができる。

5 おわりに

電気通信普及財団の助成を得て、24 年 4 月より 1 年間オーストラリアシドニー大学で行った研究についてまとめた。本研究は、誤り訂正符号化技術とネットワーク符号化技術を要素技術として用いて無線通信の省電力かつ高信頼な通信の実現を目的に行ったものである。特にリレー端末において復号の事後確率を用いて軟出力を生成し、それを転送する画期的なアイデアを用いて効率の良い通信方式を設計した。結果として、Two-way リレー通信路における省電力かつ高信頼な通信の設計が実現できた。

また、研究のみならず海外における生活、文化、教育など幅広く知見を広めることができた。この経験を活かして、さらに活躍できるように邁進したいと思う。

【参考文献】

- [1] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.50, no.12, pp.3062-3080, Dec. 2004.
- [2] P. Popovski and H. Yomo, "Bi-directional amplification of throughput in a wireless multi-hop network," in *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, May 2006.
- [3] B. Nazer and M. Gastpar, "Compute-and-forward: harnessing interference through structured codes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.57, no. 10, pp.6463-6486, Oct. 2011.
- [4] Y. Li and B. Vucetic, "Distributed soft coding with a soft input soft output (SISO) relay encoder in parallel relay channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, submitted.
- [5] X. Bao and J. Li, "Efficient message relaying for wireless user cooperation: decode-amplify-forward (DAF) and hybrid DF and coded-cooperation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.6, pp.3975-3984, Nov. 2007.

- [6]K. S. Gomadam and S. A. Jafar, "Optimal relay functionality for SNR maximization in memory less relay networks," IEEE Journal on Selected Areas on Communications, vol.25, pp.290-401, Feb. 2007.
- [7]S. Lin and D.J. Costello, "Error control coding: Fundamentals and applications," Prentice Hall, 1982.
- [8]T. Cui, F. Gao, and T. Ho, "Distributed space-time coding for two-way wireless relay networks," IEEE Transactions on Signal Processing, vol.57, no.2, pp.658-671, Feb. 2009.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Distributed Soft-Input Soft-Output (Convolutional) Encoding for Two-way Wireless Relay Networks	IEEE Transactions on Wireless Communications	投稿準備中
Two-way Relay 通信路における分散 SISO 符号化	電子情報通信学会ソサイエティ大会	25年9月発表予定