

協力無線通信システムにおける同期誤差および電力効率に関する基礎研究

代表研究者	落 合 秀 樹	横浜国立大学大学院工学研究院 准教授
共同研究者	Terry Ferrett	West Virginia University 博士課程
〃	Matthew C. Valenti	West Virginia University 教授

1 はじめに

近年、リレー（中継）端末がソース（送信）端末の情報転送に協力し、ダイバーシティ効果やパスロスによる電力損失を抑えることにより低電力で信頼性の高い通信を実現する、いわゆる協力中継無線通信への期待が高まっている。特に2つのソース端末がリレーを介して双方向に情報伝送を行う通信路（TWRC: Two-Way Relay Channel）では、従来の1対1の通信に匹敵し得るほど帯域利用効率に優れたソース・リレー端末間通信が求められる。そこで、これらの端末間通信においてネットワーク符号技術[1]を駆使することで、通信回数の削減を達成する通信プロトコルが物理層およびネットワーク層において提案されている。なかでも物理層にネットワーク符号技術を適用する手法（PLNC: Physical-Layer Network Coding）[2]は、2回の送受信のみで情報共有を達成できる最も効率の良いプロトコルとして知られている。

PLNCでは、まず始めに二つのソース端末が一斉にリレーに対して情報伝送を行う。その際に両ソース端末が同一チャネルを利用すれば帯域効率が上がるが、リレー端末では両ソース端末からの送信信号がコヒーレントに合成されたものが受信信号として受信される。ソース・リレー間の通信には異なる遅延やフェーディングが存在するため、ソース端末が互いに完全に同期をとって通信することは極めて難しい。従って、リレー端末において、二つの異なるソースからの信号を高精度に同期検波し、分離することは実用面の制約から困難であると考えられる。そこで、同期検波を用いなくても復調が可能である、周波数シフトキーイング（FSK）を用いたPLNC手法が提案されている[3, 4]。

しかしながら、ソース端末とリレー端末に用いられる局部発振回路は異なり、また安価な端末では発振周波数の安定性に欠けるため、複数のソース端末から受信される信号間には、無視できない周波数同期誤差（周波数オフセット）が存在する。そこで本研究では、そのような周波数オフセットが存在する場合に、それらを受信端末で考慮することにより特性改善を計るPLNCを提案するとともに、その有効性を計算機シミュレーションにより評価した。

2 システムモデル

図1に本研究で考慮するPLNCプロトコルおよびシステムモデルを示す。ここでは、二つのソース端末 S_1 および S_2 がそれぞれの情報を誤り訂正符号化し、得られた符号語ビット系列の各ビットを b_1 および b_2 で表している（ここで、 $b_1, b_2 \in \{0, 1\}$ である）。各ソースの送信信号の等価低域信号を $s'_1(t)$ および $s'_2(t)$ で表し、搬送波周波数を f_c とすると、バンドパス信号はそれぞれ $s_1(t) = \text{Re}\{s'_1(t) \exp(j2\pi f_c t)\}$ および $s_2(t) = \text{Re}\{s'_2(t) \exp(j2\pi f_c t)\}$ で与えられる。また、各ソースが2元周波数シフトキーイング（BFSK）により送信ビットを変調すると仮定し、送信ビット0, 1に対応する周波数を f_0, f_1 としてBFSKの周波数間隔を $\Delta = |f_0 - f_1|$ で表すと、各ベースバンド信号は一般性を失うことなくそれぞれ $s'_1(t) = \exp(j2\pi b_1 \Delta t)$ および $s'_2(t) = \exp(j2\pi b_2 \Delta t)$ で表現できる。よって第一フェーズにおいてリレー端末で受信されるバンドパス信号は $r(t) = s_1(t) + s_2(t) + n(t)$ で表現できる。ここで $n(t)$ は受信端末における雑音成分を表す。リレー端末の搬送波周波数を各ソース端末と等しく f_c とすると、受信信号の等価低域信号は $r'(t) = s'_1(t) + s'_2(t) + n'(t)$ で与えられる。第二フェーズでは、 $r(t)$ よりリレー端末が各ビット b_1, b_2 の排他的論理和 $b = b_1 \oplus b_2$ を推定し、BFSK変調等により b の推定値 \hat{b} を各ソース端末へブロードキャストする。よって、推定値 \hat{b} が誤るとともにリレーからの信号が第二フェーズで正しく受信されるか、または推定値 \hat{b} は正しいが、信号が第二フェーズで誤って各ソースに受信された場合に、ソース端末において受信ビット誤りが発生する。

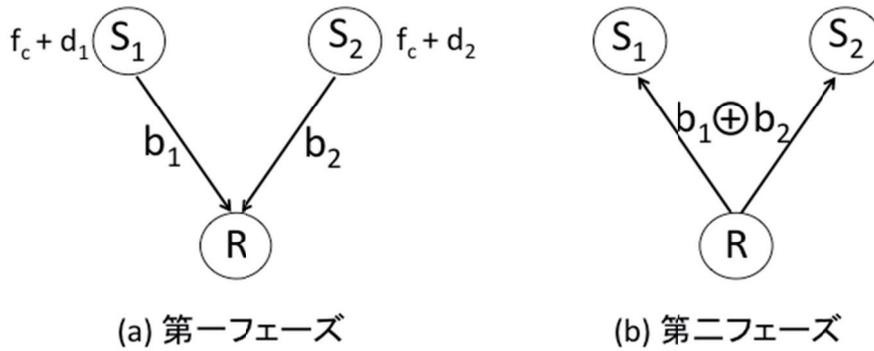


図1 PLNC プロトコル

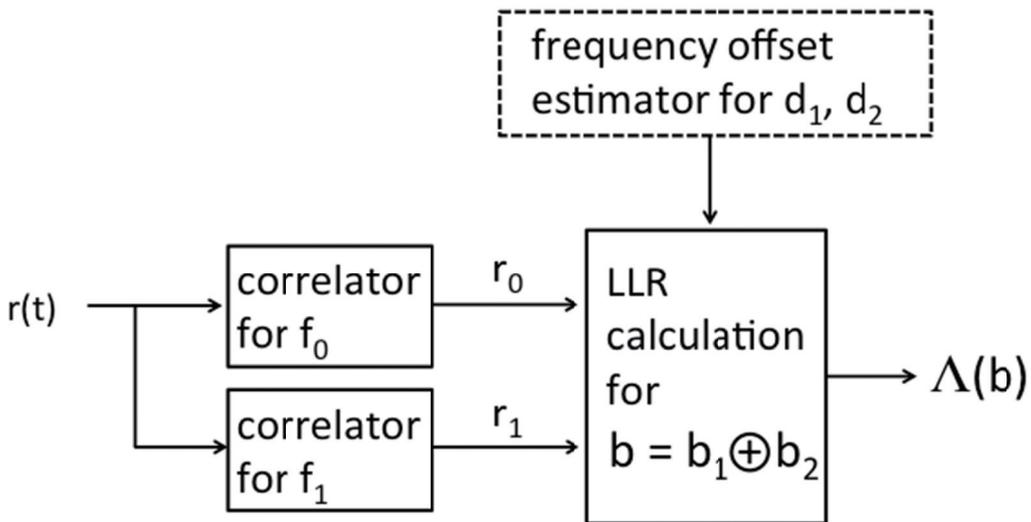


図2 リレー端末の受信回路

受信リレー端末では、まず $r(t)$ を周波数 f_0 および f_1 に対応した二つの相関器（マッチトフィルタ）に入力し、各周波数成分に対する信号強度値 r_0 および r_1 を求める。次にこれらを用いて各送信ビットの対数尤度比 (LLR: Log-Likelihood Ratio) $\Lambda(b) = \log \{P(b_1 \oplus b_2 = 1) / P(b_1 \oplus b_2 = 0)\}$ を計算し、これを軟判定復号に用いる。図2にリレー端末の受信回路における LLR 計算までの構成図を示す。

3 フェーディングおよび周波数オフセットを考慮した PLNC モデル

一章で述べたとおり、実際の通信路では、ソース端末とリレー端末には、フェーディングの影響や搬送波周波数間のオフセットが存在する。いま、図1(a)に示すように、一般性を失うことなくリレー端末の搬送波周波数を f_c 、各ソース端末の搬送波周波数をそれぞれ $f_c + d_1$ および $f_c + d_2$ で与える。ここで d_1 および d_2 はそれぞれ各ソース端末とリレー端末間の周波数オフセットであり、BFSK の周波数間隔 Δ により正規化されていると仮定する。また、ソース・リレー間の複素フェーディング係数をそれぞれ h_1 および h_2 で表現し、これらはシンボル長に対して十分緩やかに変動するもの (slow fading) と仮定すると、受信ベースバンド信号は $r'(t) = h_1 s'_1(t) + h_2 s'_2(t) + n'(t)$ と表現できる。ただしここで周波数オフセットを考慮すると $s'_1(t) = \exp\{j2\pi(b_1 + d_1)\Delta t\}$ および $s'_2(t) = \exp\{j2\pi(b_2 + d_2)\Delta t\}$ である。

本研究では、これらのモデルを先の対数尤度比の計算に用いる確率密度関数に組み込むことにより、周波数非選択性のフェーディングおよび周波数オフセット存在下において適宜オフセットの補正を行い復号する手法を提案した。本モデルの数学的な導出の詳細は、発表資料を参照されたい。以降では、計算機シミュレーションにより本モデルの有効性を示す。なお以降では、周波数オフセット d_1, d_2 の推定 (図 2) は完全であると仮定する。

4 計算機シミュレーション結果

まずはじめに、誤り訂正符号を適用しない場合の非同期検波 BFSK を用いた PLNC の特性について示す。ソース端末 S_1 の周波数オフセットを $d_1=0.04$ と仮定し、ソース端末 S_2 の周波数オフセット d_2 を変化した場合のビット誤り率特性を図 3 に示す。ここで示した結果は、受信端末において周波数オフセットが既知であるとし、これらを判定メトリックに考慮した場合である。図より、最も特性が良い結果を示しているのが $d_2=0.04$ の場合である。これは、両ソース端末の周波数オフセットが同一であるため、リレー端末が両端末に対して完全に周波数オフセットを補償でき、よって (周波数オフセットのない) 理想的な特性と一致することを示している。これに対し、 d_2 の d_1 からのずれが大きくなるに従い、リレー端末において、両ソース端末との周波数オフセットに対する補正が不可能となるため、高いエラーフロアが発生することがわかる。なおこの結果より、リレー端末で周波数オフセットを考慮する場合には、周波数オフセットの絶対値ではなく、ソース端末間の搬送波周波数の差が特性に大きな影響を与えることがわかる。

次に、誤り訂正符号として、欧州の移動体通信標準規格 UMTS で採用されている符号化率 4500/6500 のターボ符号を適用した場合の結果を図 4 に示す。ここでは、ソース端末 S_1 の周波数オフセットは存在しない ($d_1=0$) と想定した。この結果から、相対的な周波数オフセットが $d_2=0.06$ と非常に大きい場合でも、メトリックに周波数オフセットを考慮した場合は、ビット誤り率が 10^{-5} 以下を達成できることがわかる。一方、周波数オフセットを考慮しない場合は、ビット誤り率は 10^{-1} を上回る結果となっている。

以上の結果より、周波数オフセットを判定メトリックへ考慮した場合の特性改善は明らかである。(なお、本シミュレーションで設定した周波数オフセット値は、現在安価な信号発生器として広く通信実験系で用いられているソフトウェア無線機 USRP 等の実例値を参考としている。)

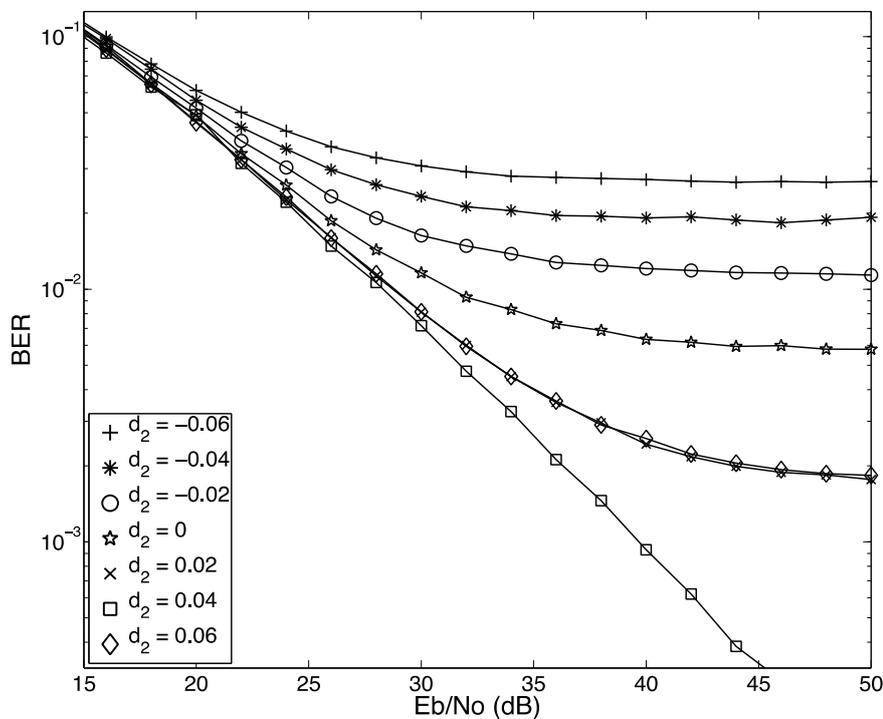


図 3 周波数オフセットを考慮した無符号化 BFSK-PLNC のビット誤り率特性 ($d_1=0.04$)

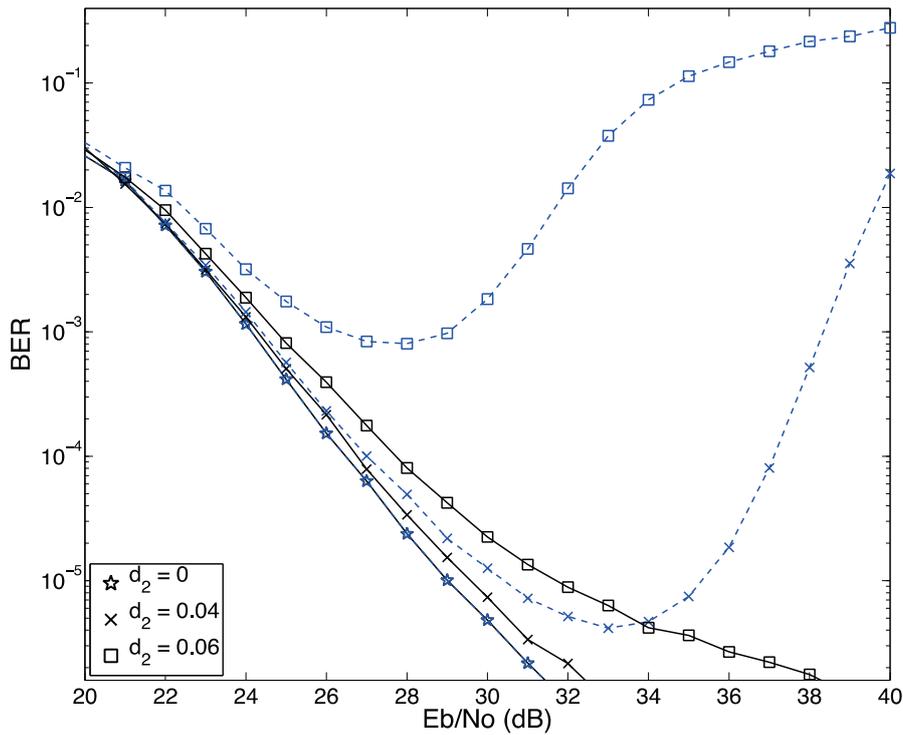


図4 周波数オフセットを考慮しない場合（点線）と考慮した場合（実線）のターボ符号化 BFSK-PLNC のビット誤り率特性 ($d_1=0$)

5 まとめ

本研究では、今後実用化が期待されるネットワーク符号化協力中継無線通信システムの一手法として、実装の際に問題となる周波数オフセットを考慮した非同期検波に基づく BFSK-PLNC についての検討を行った。ターボ符号を用いた計算機シミュレーション結果より、周波数オフセットを考慮したメトリックを用いることで、特性の大幅な改善が見込まれることを示した。今後の課題として、得られたシミュレーション結果に対する理論解析による裏付けや、高精度な周波数オフセット推定法の考案、多値 FSK への応用などが挙げられる。

【参考文献】

- [1] R. Ahlswede, N. Cai, S. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, pp. 1204-1216, July 2000.
- [2] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, "Hot topic: physical-layer network coding," in *Proceedings of ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 358-365, Sep. 2006.
- [3] J. Sørensen, R. Krigslund, P. Popovski, T. Akino, and T. Larsen, "Physical layer network coding for FSK systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 13, no. 8, pp. 597-599, Aug. 2009.
- [4] M. C. Valenti, D. Torrieri, and T. Ferrett, "Noncoherent physical-layer network coding with FSK modulation: Relay receiver design issues," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 9, pp. 2595-2604, Sep. 2011.

〈发表资料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Physical-layer network coding using FSK modulation under frequency offset	Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference 2012 Spring	2012. 5