

時間空間伝送に用いるマルチユーザ受信機の室内伝送実験

小池 俊昭[†] 村田 英一^{††} 吉田 進^{††}

[†] 京都大学 工学部

^{††} 京都大学大学院 情報学研究科

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: {koike,murata,yoshida}@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 複数送信機から同一周波数の複数信号を同時に送信することで容量の拡大, 特性の改善を図る方式を本稿では時間空間伝送 (STT: Space-Time Transmission) と呼び, STT の 1 種であるマルチユーザ受信機の実験的特性を報告している. マルチユーザ受信機として, 最尤系列推定 (MLSE: Maximum Likelihood Sequence Estimation) に基づく等化器を複数信号に拡張したトレリス符号化同一チャンネル干渉波キャンセラ (TCC: Trellis-coded Co-channel interference Canceller) および干渉キャンセル等化器 (ICE: Interference Canceling Equalizer) を取り上げ, ICE における特性劣化が TCC により改善できることを実験的に明らかにしている. 同時に, FPGA および DSP などを用いて構築した 2 送信機, 2 受信機の RF 帯による時間空間伝送室内実験系の測定結果が計算機シミュレーションの結果とよく一致することを示している.

キーワード 時間空間伝送, マルチユーザ受信機, 最尤系列推定, トレリス符号化変調, DSP

Laboratory Experiments of Multi-User Detector for Space-Time Transmission

Toshiaki KOIKE[†], Hidekazu MURATA^{††}, and Susumu YOSHIDA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Kyoto University

^{††} Graduate School of Informatics, Kyoto University

Yoshida-hommachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: {koike,murata,yoshida}@hanase.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract This paper reports the experimental results of multi-user detectors for a space-time transmission (STT) system which uses multiple antennas at both the transmitter and the receiver as one of solutions to achieve high capacity and high performance. Trellis-coded co-channel interference canceller (TCC) and interference canceling equalizer (ICE), which have been studied as a form of multi-user detector, employ a maximum likelihood sequence estimation (MLSE) based approach with multi-signal extension. By laboratory experiments, this paper reveals that TCC is superior to ICE in line of sight environment. In the experiments, the BER performance of TCC and ICE is given by a prototype system which have two transmitters and two receivers.

Key words Space-time transmission, Multi-user detector, Maximum likelihood sequence estimation, Trellis-coded modulation, Digital signal processor

1. ま え が き

携帯電話，無線 LAN などデジタル無線通信の活躍の場が急速に拡大する中，良好な電波伝搬特性を有する周波数帯域が逼迫している．増大の一途をたどる電波需要に対して限られた無線資源を有効に利用し，周波数利用効率を向上することが重要な課題の1つである．

近年，複数の送受信アンテナを用いたシステムに関する研究が注目を集めており，TCC(Trellis-coded Co-channel interference Canceller) [1] ~ [3] をはじめとして BLAST(Bell laboratory LAYered Space-Time architecture) [4]，STC(Space-Time Coding) [5] など様々な方式が提案されている．BLAST は，異なる情報を複数の送信アンテナから同一周波数において同時に並列伝送し，受信側において干渉抑圧で制御されたダイバーシチ受信とレプリカ減算によって信号分離を行う方式である．この方式は多数の送信機を用いることで周波数利用効率を向上することができるが，原理的に受信機数が送信機数以上必要であり，そのままでは遅延波対策が困難であるなどの課題がある．また，STC は同一情報に異なった符号化を施して複数のアンテナから送信することにより特性を改善する送信ダイバーシチ技術である．本稿では，従来干渉信号と見なされてきた同一周波数の複数信号を意図的に送信することで容量または特性の向上を図るシステムを時間空間伝送 (STT: Space-Time Transmission) と呼ぶ．

一方，従来より適応等化器を複数信号に拡張することで同一チャネル信号の分離を可能とするマルチユーザ受信機の研究が行われてきた．この研究の1つとして全ユーザの信号を同時に最尤系列推定する ICE(Interference Canceling Equalizer) [6] が提案されている．ICE は同一チャネル信号の分離のみならず遅延波等化能力にも優れている．しかし，通常良好な環境とされる遅延波のない見通し内伝搬などでは特性劣化を生じることが計算機シミュレーションなどで指摘されてきた．

当研究室では各ユーザ独立に TCM(Trellis-Coded Modulation: トレリス符号化変調) を施すことにより ICE の特性劣化を改善することができる TCC を提案してきた．TCC，ICE はいずれも最尤系列推定 (MLSE: Maximum Likelihood Sequence Estimation) に基づく方式であり信号分離特性に優れ，基本的に受信機数に制限がない．これらの方式はともに同一周波数の複数信号を分離する点で BLAST など

と同じ STT のシステムに位置付けられる．

STT における各方式を比較するために DSP(Digital Signal Processor)，FPGA(Field Programmable Gate Array) などを用いて 2 送信機，2 受信機の室内伝送実験系を構築してきた．これまでも DSP，FPGA などを用いた ICE および TCC の室内実験結果 [7] ~ [9] が報告されている．しかし，ICE の実験では静的伝搬路における特性が計算機シミュレーションと一致せず，IF における TCC の実験では十分な精度が得られていなかった．本稿では新たに構築した RF による実験系を用いてマルチユーザ受信機の中でも有力と思われる TCC，ICE の特性比較を行い，遅延波のない見通し内伝搬などにおける ICE の特性劣化が TCC の適用により改善されることを実験的に示す．

2. 原 理

2.1 TCC の原理

図 1 に TCC，ICE の構成を示す．エンコーダ部を TCM とすることで TCC，QPSK とすることで ICE の信号処理となる．以下では，送信信号数を N ，受信機数を M として一般化した原理を説明する．各信号独立に TCM を施すとき，第 n 送信機からの情報シンボル系列を $\{s_j^{(n)}\}$ として，複素送信シンボル系列 $\{x_j^{(n)}\}$ は以下のように表わされる．

$$x_j^{(n)} = m^{(n)}(s_j^{(n)}, s_{j-1}^{(n)}, \dots, s_{j-L(n)+1}^{(n)}) \quad (1)$$

ここで， $m^{(n)}(s_j^{(n)}, s_{j-1}^{(n)}, \dots, s_{j-L(n)+1}^{(n)})$ は TCM による時刻 j での変調を表している． $L^{(n)}$ は，第 n 送信信号の TCM の拘束長である．

第 m 受信機における複素受信信号系列 $\{r_j^{(m)}\}$ は，第 n 送信信号の最大遅延シンボル数を $K^{(n)}$ ，ガウス雑音系列を $\{w_j^{(m)}\}$ として，以下のように表される．

$$r_j^{(m)} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{K^{(n)}} f_k^{(mn)} x_{j-k}^{(n)} + w_j^{(m)} \quad (2)$$

ここで， $\{f_k^{(mn)}\}$ は第 n 送信信号の第 m 受信機における送受信フィルタ特性を含めたインパルス応答を表す．

ダイバーシチ合成法として 2 乗ブランチメトリック合成を採用し，推定シンボル系列 $\{\hat{s}_j^{(n)}\}$ を用いて MLSE のブランチメトリックは次式で与えられる．

$$\gamma[\{r_j^{(m)}\}] = \sum_{m=1}^M \left| r_j^{(m)} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{K^{(n)}} f_k^{(mn)} \hat{x}_{j-k}^{(n)} \right|^2 \quad (3)$$

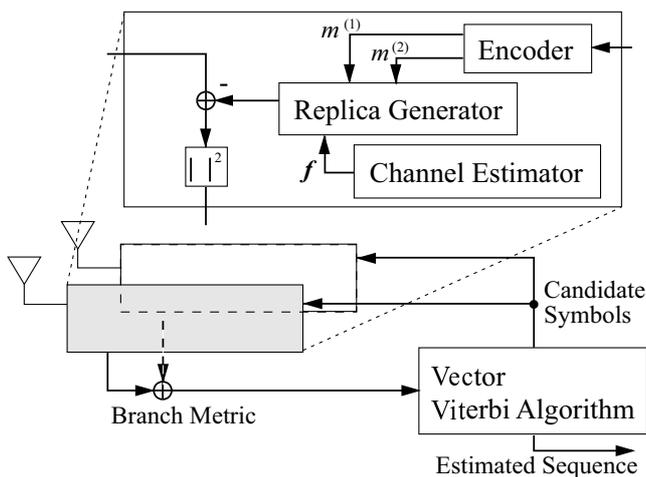


図 1 TCC, ICE の受信部構成

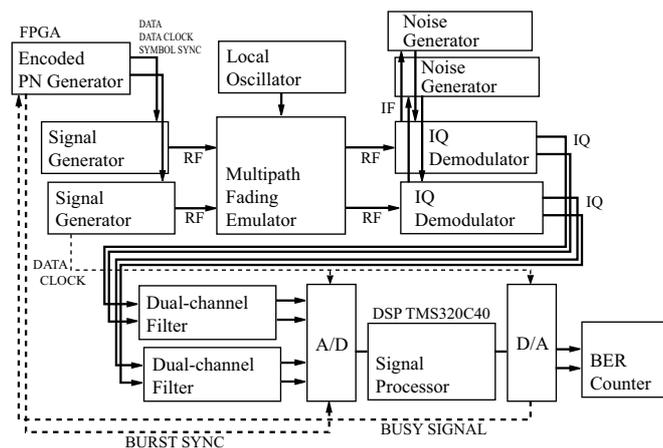


図 3 室内実験系の構成

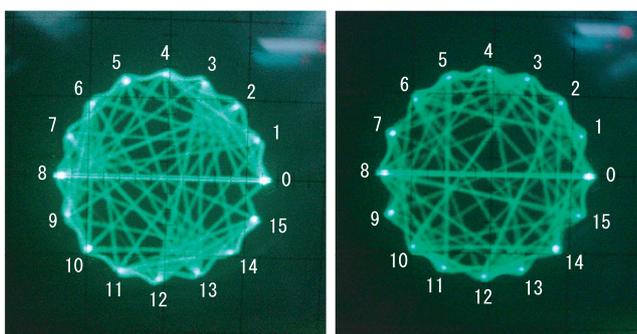


図 2 TCM のコンスタレーション

ここで,

$$\hat{x}_j^{(n)} = m^{(n)}(\hat{s}_j^{(n)}, \hat{s}_{j-1}^{(n)}, \dots, \hat{s}_{j-L(n)+1}^{(n)}) \quad (4)$$

である.

式 (3) は, $\hat{s}_{j-1}^{(n)}$ から $\hat{s}_{j-K(n)-L(n)+1}^{(n)}$ の連続した過去 $K(n) + L(n) - 1$ シンボルに依存しており, Viterbi アルゴリズムの状態数 N_{state} は情報シンボル系列 $\{s_j^{(n)}\}$ の変調多値数を P として

$$N_{\text{state}} = P^{\sum_{n=1}^N (K(n) + L(n) - 1)} \quad (5)$$

と表される. 式 (5) の通り状態数は信号数に対して指数関数的に増加するが, 効率のよい状態数削減法がいくつか知られている. 本稿では状態に与えるシンボルをパス履歴の参照により代用する DDFSE [10] を用いる.

2.2 TCC における TCM

ICE は 2 信号の受信振幅に違いが見られる各波独立なフェージング環境では優れた特性を示すが, 2 信号の受信振幅が同程度となる静的環境および仲上フェージング環境ではレプリカの重なりが生じやすく, 特性が大幅に劣化する. TCC はこの特性劣化を改善するために考案されたものであり, 各ユーザ独

立に TCM を施し, 全ユーザを同時推定するトレリス線図において最小ユークリッド距離を確保, もしくはそれを与えるパス数を減少させる規範に基づき設計されている.

本稿で用いた所望波用, 干渉波用の TCM のコンスタレーションを図 2 に示す. これはロールオフ率 $\alpha = 1.0$ のナイキストフィルタを適用したときの複素ベースバンド送信波形である (ただし, 実験は $\alpha = 0.5$ のルートナイキスト). なお, 図は BPSK のトレーニング系列区間も含んでいるため, 信号点 0, 8 間の遷移線が強調されている.

3. 実験系の構成

構築した室内実験系の構成を図 3 に示す. 所望波, 干渉波用にそれぞれ符号化された 2 系統の M 系列信号を FPGA により生成する. なお, FPGA デバイスは回路規模 2 万ゲートの Altera 社 FLEX10K20 を用いている. 符号化された各バーストデータに基づいて Signal Generator により RF 帯搬送波を変調する. この RF 信号は Multipath Fading Emulator を通ってフェージングを受け, Noise Generator によるガウス雑音を印加した上で IQ Demodulator により直交復調される. このベースバンド IQ 信号は受信フィルタを通して 12 bit A/D 変換器によりサンプリングされる. バースト受信終了後, DSP により 2 信号最尤系列推定を行い, BER Counter にて誤り率を計測する. なお, DSP は 32 bit 浮動小数点演算が可能である TI 社 TMS320C40 を使用している.

実験系は送信機として Signal Generator 2 台, 受信機として IQ Demodulator 2 台を用いる 2×2 の STT システムである. A/D, D/A 変換器は Signal Generator からのシンボル同期信号により駆動している. また, FPGA は DSP の信号処理が終了する

表 1 室内実験の諸元

Modulation	Trellis-Coded 16PSK (TCC) QPSK (ICE)
Tx filter	Square-root Nyquist (Roll-off factor: $\alpha = 0.5$)
Carrier frequency	900 MHz
Symbol rate	18 ksymbol/sec
Training sequence	11-symbol
Information sequence	60-symbol
Channel	Quasi-static Rayleigh, Nakagami fading ($f_D T_s = 1/1000$)
Channel estimation	RLS algorithm Tracking: LMS algorithm
Transversal filter	2-tap \times 2
Viterbi algorithm	16-state

表 2 トレリス符号化 16PSK の符号化則

$m^{(1)}$				$m^{(2)}$					
State	0	1	2	3	State	0	1	2	3
0	0	4	12	8	0	0	4	8	12
1	1	5	13	9	1	13	9	5	1
2	3	7	15	11	2	15	11	7	3
3	2	6	14	10	3	2	6	10	14

のを確認して次バーストの間欠送信を行っている。

4. 実験の諸元

主な実験諸元を表 1 に示す。変調速度は A/D 変換器からの割り込みの安定性確保のため 18 ksymbol/sec に制限された。また、RF 帯搬送波周波数を 900 MHz としている。送信フィルタにはロールオフ率 0.5 のルートナイキストフィルタ、受信フィルタには位相直線性ローパスフィルタを用いた。TCC の変調方式には符号化率 2/4 の 4 状態トレリス符号化 16PSK を用いており、所望波用、干渉波用の符号化則は表 2 の通りである。ただし、信号点配置は図 2 に従う。ICE の変調方式には QPSK 変調を用いており、各ユーザ 1 シンボルあたり 2 bit を送信するため周波数利用効率は TCC と等しい。TCC の主なパラメタは $L^{(1)} = L^{(2)} = 2$, $K^{(1)} = K^{(2)} = 1$ であり、状態数が 64 となることを DDFSE により 16 に削減している。伝搬路初期推定は RLS アルゴリズムを用いており、状態毎に LMS アルゴリズムによるトラッキングを行う。なお、高速フェージングに対応するために忘却係数を 0.8 としている。バーストは先頭 11 シンボルのトレーニング系列とそれに続く 60 シンボルの情報系列で構成されている。

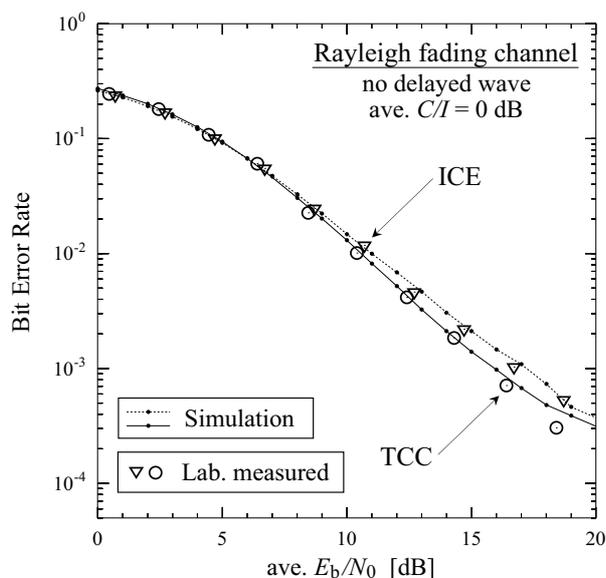


図 4 室内実験と計算機シミュレーションによる E_b/N_0 対 BER 特性 (レイリーフェージング伝搬路, 1 パス)

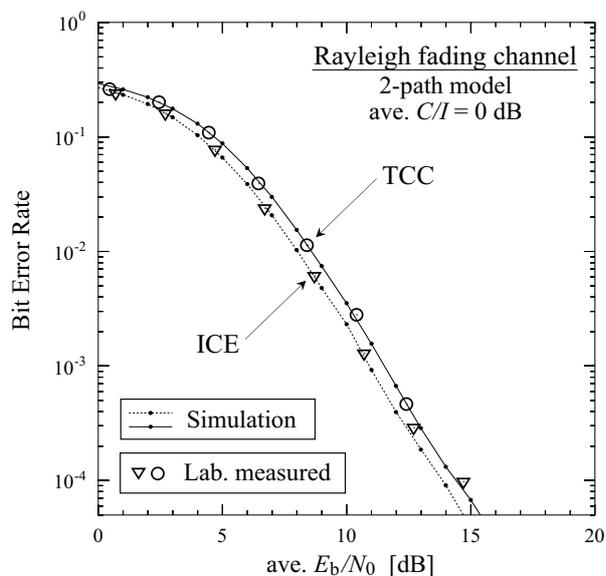


図 5 室内実験と計算機シミュレーションによる E_b/N_0 対 BER 特性 (レイリーフェージング伝搬路, 2 パス)

5. 実験の結果

5.1 レイリーフェージング伝搬路

図 4 に遅延波が存在しない (1 パスモデル) ときのレイリーフェージング伝搬路における TCC, ICE の実験結果と計算機シミュレーション結果を示す。ただし、所望波と干渉波の平均電力比は等しく ($C/I = 0$ dB), 正規化最大ドップラ周波数は $f_D T_s = 1/1000$ である。なお、 E_b/N_0 は 1 万バーストの実測 S/N の平均値を用いて算出している。図によると、計算機シミュレーションと実験計測の結果がよく一致しているこ

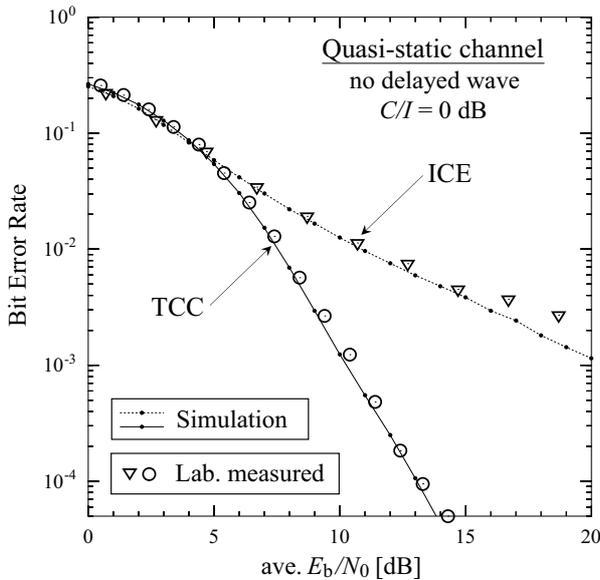


図 6 室内実験と計算機シミュレーションによる E_b/N_0 対 BER 特性 (準静的伝搬路, 1 パス)

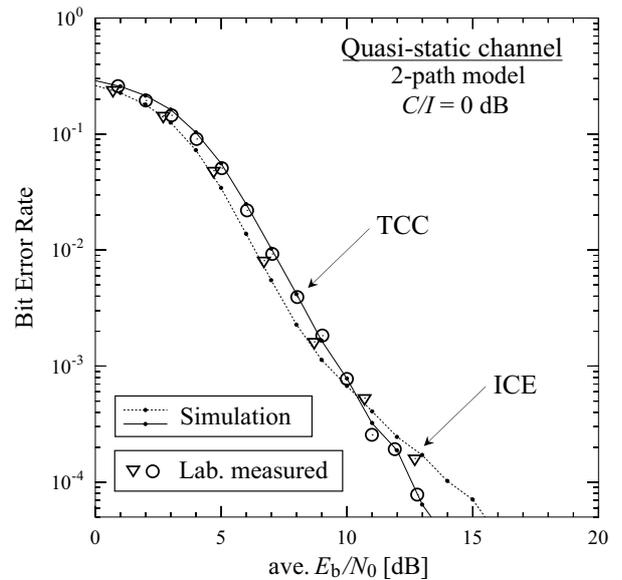


図 7 室内実験と計算機シミュレーションによる E_b/N_0 対 BER 特性 (準静的伝搬路, 2 パス)

とが確認できる。また、フラットフェージング環境下では TCC と ICE に大きな特性の差が見られない。

次に等電力の 1 シンボル遅延波が存在するとき (2パスモデル) のレイリーフェージングにおける実験特性を図 5 に示す。1 パスモデルの場合と同様に TCC と ICE の特性に大きな差は見られない。ただし、TCC は ICE と同程度の演算量とするために DDFSE による状態数削減を施している。

5.2 準静的伝搬路

図 6 に準静的伝搬路 1 パスモデルにおける TCC, ICE の実験結果と計算機シミュレーション結果を示す。本稿における準静的伝搬路とは、各信号の振幅が一定であり位相がゆっくり変化している環境である。図によると、計算機シミュレーションと実験計測の結果がよく一致していることがわかる。また、ICE による特性劣化が TCC により改善されていることが確認できる。

等電力 2 パスモデルのときの特性結果を図 7 に示す。これによると遅延波が存在するときには ICE の特性劣化は見られず、TCC とほぼ同特性であることが確認できる。ICE において遅延波が存在しない環境では MLSE としてではなく MLD (Maximum Likelihood Detection: 最尤判定) として動作するためにむしろ遅延波が存在する環境の方が特性が改善され得る。一方 TCC は畳み込み符号化を適用することにより遅延波の有無によらず MLSE として動作させることができる。

次に $E_b/N_0 = 13$ dB としたときの C/I 対 BER 特

性の比較を図 8 に示す。図 6 と同様に実験結果はシミュレーション結果とよく一致している、これによると TCC の適用により特性が改善されることが確認できる。ICE の特性劣化は信号点重なりによる不確実性が要因である。2 信号 QPSK の場合の ICE では $C/I = 0, \pm 3$ dB 付近でこの信号点重なりが生じる。図 6 の実験特性ではこのときの劣化が顕著ではないが、 S/N が十分大きいところではこの特性劣化が強調されて確認できる。準静的伝搬路における受信波形の信号点重なりの様子を図 9 に示す。

5.3 伸上フェージング伝搬路

STT の信号処理方式はレイリーフェージング伝搬路を仮定することが多い。これは、各受信信号の振幅変動が乏しいときに信号分離が難しくなるためである。そのため、通常は良好な伝搬路であるとされる静的伝搬路や伸上フェージング伝搬路などの見通し内伝搬はむしろ劣悪な環境となる。 $E_b/N_0 = 13$ dB, $f_D T_s = 1/1000$ としたときの伸上フェージング伝搬路におけるライスファクタ k に対する実験特性を図 10 に示す。ライスファクタ $k = 0$ がレイリーフェージングであり、 k の増加とともに静的伝搬路に近づく。図によるとライスファクタのほぼ全域において TCC の方が ICE の特性より優れていることが確認できる。

6. むすび

複数の送受信機を用いて無線周波数資源を有効利用する STT は、電波需要の拡大に対する有効な解決策の 1 つである。中でも従来マルチユーザ受信機と

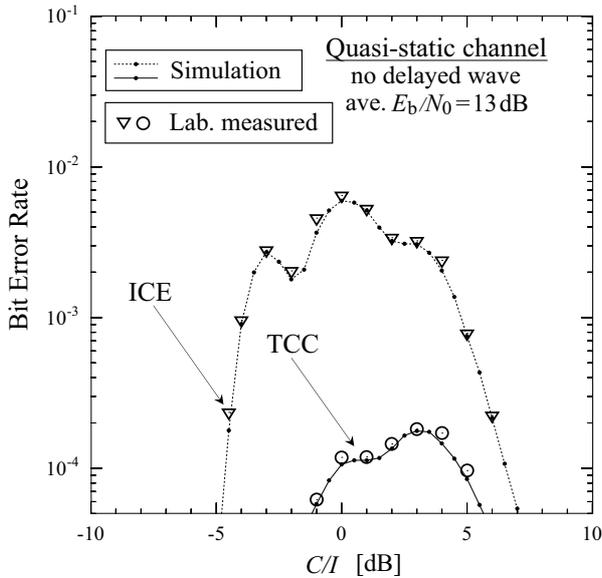


図 8 室内実験と計算機シミュレーションによる C/I 対 BER 特性 (準静的伝搬路)

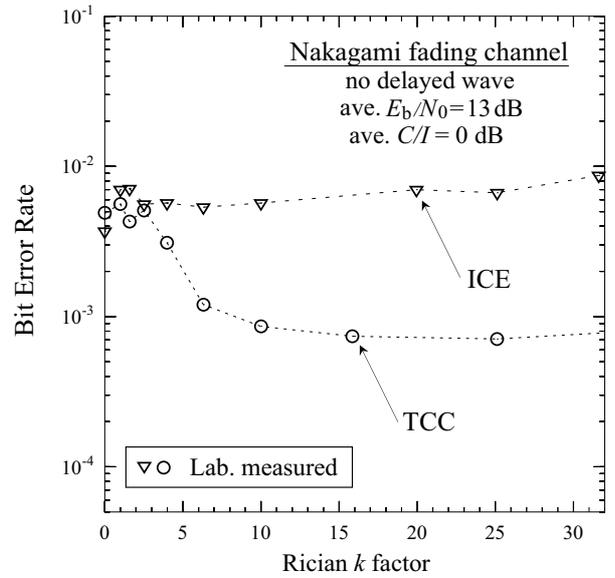


図 10 室内実験によるライスファクタ k 対 BER 特性 (仲上フェージング)

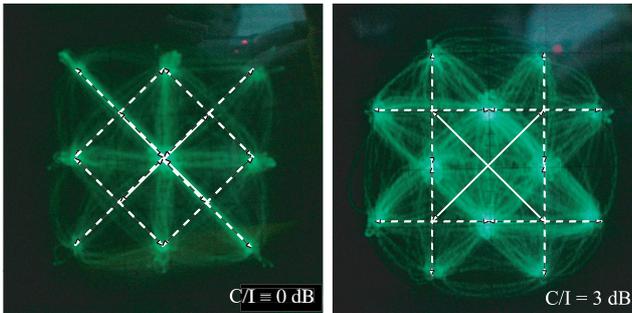


図 9 ICE における信号点重なり発生時の受信波形の様子

して研究されてきた TCC, ICE は干渉波分離特性, 遅延波等化能力などに優れており, 高い伝送容量を実現するためにシングルユーザのシナリオに適用することも可能である. 本稿では STT における 2 信号並列伝送, 2 受信機の RF 帯による室内伝送実験系を構築し, マルチユーザ受信機として研究されてきた TCC および ICE の特性比較を行った.

実験結果の精度は十分であり, 計算機シミュレーション結果とよく一致している. 2 パスモデルおよびレイリーフェージング伝搬路では TCC と ICE はほぼ同特性であるが, STT で問題となる静的伝搬路や仲上フェージング伝搬路などの見通し内環境において TCC を適用することにより ICE の特性が改善されることを実験的に明らかにした. 本システムの周波数利用効率は 1 信号 QPSK 変調の場合の約 2 倍 (4bit/sec/Hz) であり, 並列伝送信号数を増やすことで更に利用効率を倍増することができる.

文 献

- [1] 村田 英一, 吉田 進, 竹内 勉, “トレリス符号化同一チャネル干渉波キャンセル方式”, 信学技報, RCS93-75, pp. 39-46 (1993).
- [2] H. Murata and S. Yoshida, “Performance of trellis-coded co-channel interference canceller for cellular radio”, Proceedings of International Workshop on Multi-dimensional Mobile Communications (MDMC), pp. 109-112, (1994).
- [3] H. Murata and S. Yoshida, “Trellis-coded co-channel interference canceller for microcellular radio,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 9, pp. 1088-1094 (1997).
- [4] G. J. Foschini, “Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas,” *Bell labs. Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41-59 (1996).
- [5] V. Tarokh, N. Seshadri and A. R. Calderbank, “Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction,” *IEEE Trans. Inf. Theory.*, vol. 44, no. 2, pp. 744-765 (1998).
- [6] 吉野 仁, 鈴木 博, “RLS-MLSE を拡張した適応干渉波キャンセル,” 信学技報, RCS92-120, pp. 25-30 (1993).
- [7] H. Yoshino and H. Suzuki, “Experimental evaluation of interference canceling equalizer (ICE) for a TDMA mobile communication system,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E84-B, no. 2, pp. 228-237 (2001).
- [8] 村田 英一, 松村 善洋, 藤原 淳, 吉田 進, “トレリス符号化同一チャネル干渉波キャンセルの室内実験結果,” 信学技報, RCS95-105, pp. 45-50 (1995).
- [9] 村田 英一, 塚本 悟司, 富里 繁, 松本 正, 吉田 進, “FPGA を用いて実現したトレリス符号化同一チャネル干渉波キャンセルのリアルタイム室内伝送実験,” 信学論, vol. J84-B, no. 7, pp. 1226-1232 (2001).
- [10] A. Duel and C. Heegard, “Delayed decision feedback sequence estimation,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-37, no. 5, pp. 428-436 (1989).