

狭帯域高信頼性デジタル変調方式 に関する研究

笹瀬 巖
慶應義塾大学 理工学部
電気工学科 専任講師

1. はじめに

近年、通信の需要の急激な増加に伴い、デジタル通信における電力および周波数帯域の有効利用が大きな課題となっているが、本研究では、狭帯域高信頼性デジタル変調方式に関する研究と題して、以下の5つの研究課題について研究を行った。

- 1) 優れたスペクトル特性を持つ狭帯域デジタル変調方式に誤り訂正技術を適用して、より信頼性の高い狭帯域符号化変調方式を見いだす。
- 2) 周波数利用効率向上および大容量化を図るために変調信号を多値化すると、干渉波、雑音、非線形性等の影響を受けやすくするため、これらによる劣化の度合を明らかにし、劣化の度合が小さい多値デジタル変調方式を見いだす。
- 3) デジタル変調信号に雑音や干渉波が重畳した場合の影響を考察し、特に、判定帰還フィルタを用いた雑音および干渉波の効果的な除去または抑圧方法について検討する。
- 4) 非線形システムの及ぼす影響を考慮し、非線形システムにおいて優れた特性を有するデジタル変調方式を見いだす。
- 5) 光通信チャンネルの伝送特性を有効に利用して、光通信チャンネルに適した誤り訂正方法を見だし、デジタル光通信方式の高信頼性、狭帯域化を図る。
- 6) デジタル通信ネットワークにおいて、従属同期網の累積ジッタ特性の改善と、任意の個数の処理システムを有する待ち行列系の平均待ち時間と平均並び替え時間の低減を図る。

以下、それぞれの研究課題における研究成果の概要を述べる。

2. 狭帯域高信頼性デジタル符号化変調方式に関する研究

デジタル変調方式においては、狭帯域化および誤り率特性の一層の改善が求められており、誤り訂正技術を利用した、狭帯域でかつ信頼性の高い符号化デジタル変調方式に関する研究が盛んに行われている。特に、図1に示すトレリス符号化変調方式は、符号器と冗長度のある信号点配置を組み合わせ、信号点の遷移を制限することによってユークリッド距離を実質的に大きくし、伝送レート、スペクトル効率を下げることなく、大きな符号化利得が得られる変調方式として注目されている。そこで、本研究では、優れたスペクトル特性を持つ狭帯域デジタル変調方式に、トレリス符号化等の誤り訂正技術を適用して、より信頼性の高い狭帯域符号化変調方式を見いだすことを目的として研究を行った。以下、本研究で得られた研究成果の要約を述べる。

- 1) スペクトルの集中性の優れたデジタル変調方式である連続位相変調方式に、誤り訂正符号を単純に組み合わせるだけでなく、図2に示すように、複数の変調指数、および、非対称なマッピングを用いて、変調方式と符号化の組合せに工夫を凝らすことにより、ユークリッド距

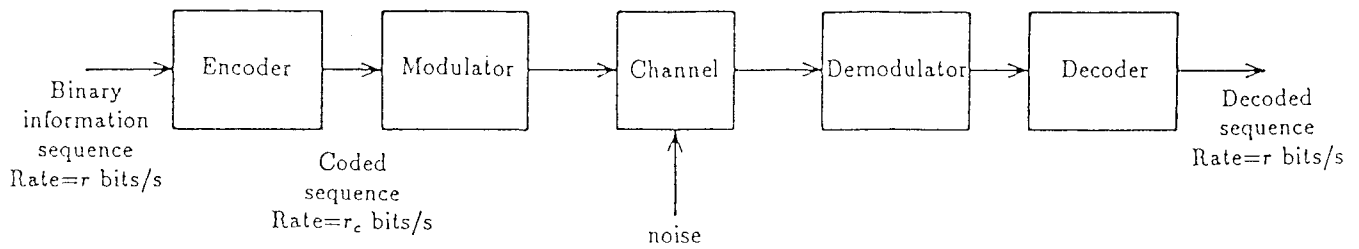


図1 トレリス符号化変調方式

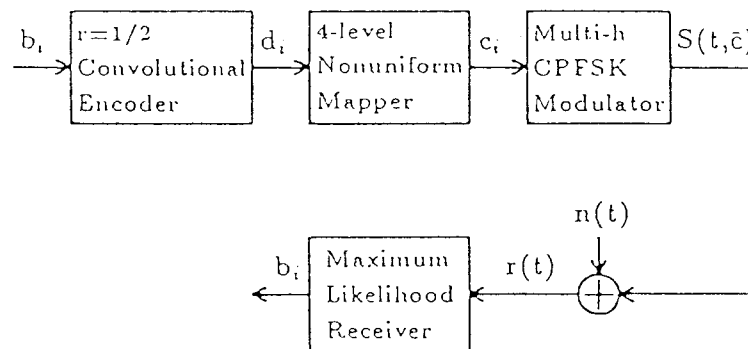


図2 非対称マッピングMulti-h 畳込み符号化4相CPFSKのシステムブロック図

離を拡大できることが示された。また、誤りパスの個数と平均出現確率も減少させることができることが示され、誤り率特性を一層改善できることが明らかになった⁽⁸⁾。

2) トレリス符号化を用いて、PSKとFSKとを組合せ、さらに、位相と周波数を考慮した信号点配置を一様ではないように変形することにより、電力および周波数帯域を増加させずに、許される遷移信号点配置内のユークリッド距離が拡大でき、より大きな符号化利得が得られることを明らかにした⁽⁹⁾。

3) マルチプルトレリス符号化連続位相変調方式に、非対称なマッピングを組み合わせ工夫を凝らすことにより、従来誤り訂正できなかった平行パス誤りが訂正できるようになり、ユークリッド距離を大きくすることが可能となり、誤り率特性が一層改善できることが明らかになった⁽²²⁾。

3. 多値デジタル変調方式に関する研究

多値のデジタル信号を用いることにより、周波数利用効率の向上、および、大容量化が図られているが、多値化すると、干渉波、雑音、非線形性等の影響を受けやすくなるため、これらによる劣化の度合を明らかにし、劣化の度合が小さい狭帯域多値デジタル変調を見いだすことは極めて重要である。そこで、本研究では、代表的なデジタル多値変調方式である、QAM、および、QPRS変調方式において、スペクトル効率、および、誤り特性の改善を行うことを目的とし、研究を行った。以下、本研究で得られた研究成果の要約を述べる。

- 1) 多値QPRS (class-IV) 変調方式においてスペクトル効率を高めるため、ナイキストレートより大きな伝送レートを用いると、誤り率が劣化するが、独特のフィルタリングを施すことによって、従来に比べて、誤り率の劣化の度合を小さく保ちながら大きなスペクトル効率を得ることができる方法を提案した⁽²⁾。
- 2) 多値QAM、および、QPRSにおいて、矩形パルスのパルス幅を狭くすることにより、従来の $x/\sin(x)$ 振幅イコライザを用いなくても、良好な誤り率特性を得ることができることを示した⁽⁶⁾。
- 3) 非線形チャネルでの多値QAM、および、QPRSの誤り率特性の比較検討を行った⁽¹⁴⁾。
- 4) 多値ダイコードQPRS変調方式において、ベースバンド低域スペクトルをサービスチャネルとして利用すると、従来の多値QPRS (class-IV) 変調方式より、誤り率の劣化を低く抑えたまま、広いサービスチャネルを利用することができることを示した⁽²⁰⁾。

4. デジタル変調方式における雑音および干渉波の除去に関する研究

デジタル変調信号を伝送すると、通信路において、雑音や干渉波が加わり、波形歪が生ずる。よって、雑音や干渉波が重畳した場合の影響を考察し、雑音および干渉波の効果的な除去あるいは抑圧方法について検討することは極めて重要である。そこで、本研究では、特に、図3に示す判定帰還トランスバーサルフィルタを用いて、デジタル変調信号に重畳した雑音および干渉波の効果的な除去あるいは抑圧を行うことを目的とし、研究を行った。以下、本研究で得られた研究成果の要約を述べる。

- 1) QPSKシステムにおいて、判定帰還トランスバーサルフィルタを用いることにより、複数個の正弦波状干渉波を除去できることを明らかにし、最適なタップ重みを求めた⁽⁵⁾。
- 2) QPSKシステムに、有色雑音と干渉波が含まれる場合にも、判定帰還トランスバーサルフィルタを用いることにより、有色雑音と干渉波を共に抑圧できることを示し、両側判定帰還フィルタが片側判定帰還フィルタよりも有効であることを明らかにした⁽⁷⁾。
- 3) QPRSシステムにおいても、判定帰還トランスバーサルフィルタを用いて、CW干渉波とPRSフィルタによって生じた有色雑音を抑圧することができることを明らかにし、最適なタップ重みを求めた⁽¹⁸⁾。
- 4) QPSKシステムにおいては、判定帰還トランスバーサルフィルタを用いることにより、オンオフを繰り返すパルス状のCW干渉波も除去できることを明らかにし、最適なタップ重みを求めた⁽²¹⁾。

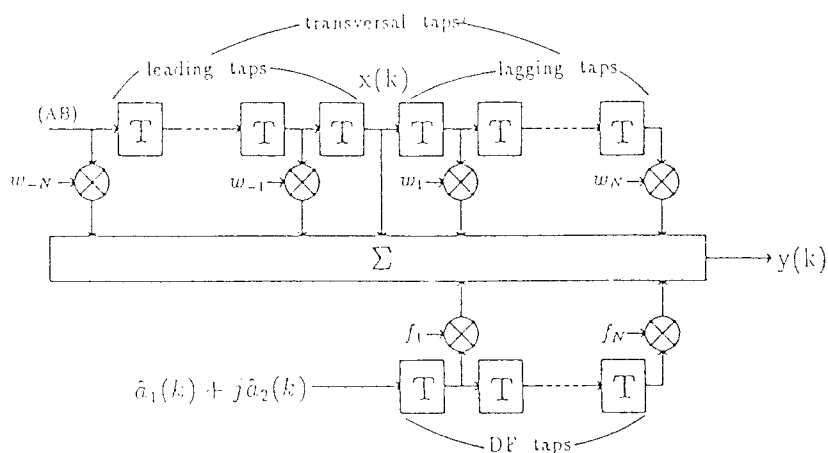


図3 判定帰還トランスバーサルフィルタ

5. 非線形システムおよびデジタル衛星通信に関する研究

電力有効利用の観点から、増幅器を飽和領域で止揚することが考えられているが、その結果生じるシステムの非線形性が及ぼす影響を考察し、非線形伝送系において、誤り率特性が優れているデジタル変調方式を見いだすことは、極めて重要である。また、周波数帯域有効利用の為、非線形な衛星通信チャネルでのスペクトルの集中性が優れた変調方式を見いだすことも大きな研究課題となっている。そこで、本研究では、特に、信号が非線形システムを通過した場合の出力SN比に及ぼす影響の解析、図4に示す非線形衛星通信チャネルにおける混変調雑音の低減法、および、ハイブリッドARQ/FECシステムのスループット特性の改善を行うことを目的とし、研究を行った。以下、本研究で得られた研究成果の要約を述べる。

- 1) 信号が非線形システムを通過した場合の入出力SN比の変化については、まず、非線形増幅器、及び非線形包絡線検波器の出力を適当に組み合わせることにより、出力SN比が改善できることを明らかにした^[11]。
- 2) 非線形包絡線検波器において、出力高調波成分を利用することにより、出力SN比が改善できることを示した^[14]。従来の研究では、非線形性は望ましくないものをなるべく抑えることに主眼がおかれていたが、本研究では、むしろ積極的に非線形性を利用することにより特性の改善を狙っているという点で特色がある。
- 3) 非線形衛星通信チャネルによって生ずる混変調雑音を低減するブロック分割スロット設定法を提案し、キャリアで満たされたSCPCシステムにおいても、帯域をほとんど広げずに、十分に相互変調雑音を低減できることを明らかにした^[3, 27]。
- 4) Type II 選択リピート型ハイブリッドARQ/FECシステムにパンクチャド冗み込み込み符号を用いることにより、高スループットを得ることができることを明らかにした^[16]。

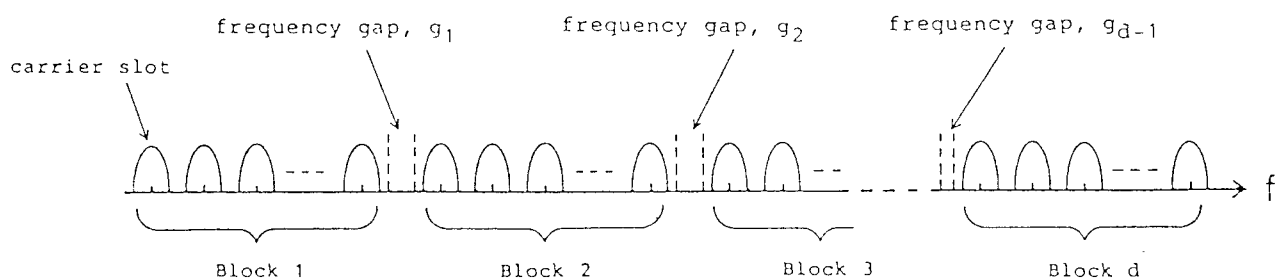


図4 ブロック分割スロット設定法

6. 光チャネルにおけるデジタル符号化変調方式に関する研究

光通信、特に、深宇宙通信等で有望視されている光子計数通信においては、光通信チャネルが、図5に示すような非対称消失通信路となる。そこで、本研究では、光子計数通信路の非対称性に適した符号化、復号化を用いて、誤り率特性、周波数特性の改善、および復号の高速化を図ることに目的とし、研究を行った。以下、本研究で得られた研究成果の要約を述べる。

- 1) 光子計数通信チャネルにおけるViterbi復号において、チャネルの非対称性を利用した高速復号方式RPVD (Reduced Path Viterbi Decoder) を提案した。この方式は、正しいパスである可能性のきわめて小さいパスを除去することにより、Viterbi復号の復号時間の大部分をしめるAdd-Compare-Select (ACS) の回数的大幅な削減を可能としている。理論解析、及び、計算機シミュレーションの結果、誤り率特性を劣化させることなく、ACSの回数的大幅な低減ができることが示され、光通信チャネルにおける高速化復号としてきわめて適した方式であることが明らかになった⁽¹⁰⁾。
- 2) 光通信チャネルの非対称性を利用することにより、メトリックの計算回数を大きく削減し、逐次復号の最大の問題点であるオーバーフロー誤りの確立をきわめて小さくできる逐次復号法を提案した⁽¹¹⁾。
- 3) 光通信チャネルにおいて、リードソロモン符号を用いたマルチパルスPPMを提案し、通信容量及び誤り率特性の解析を行なった⁽¹³⁾。
- 4) 光通信チャネルにおいて、パンクチャド畳み込み符号を用いたPPM方式を提案し、従来より、誤り率特性、周波数特性の改善が図れることを明らかにした⁽²⁶⁾。

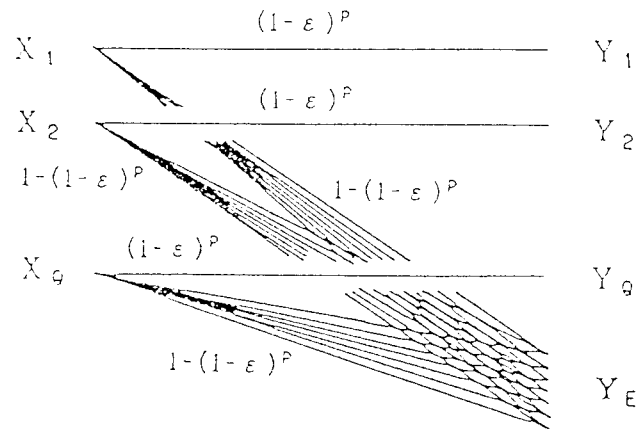


図5 非対称消失通信路

7. デジタル通信ネットワークに関する研究

デジタル通信の高度化に伴い、デジタル通信ネットワークの一層の有効利用が求められている。そこで、本研究では、特に、図6に示すような複数の処理システムを有する待ち行列系を解析することにより、ネットワークシステムのスループットの増大、遅延時間の短縮等の特性改善を行うことを目的とし、研究を行った。以下、本研究で得られた研究成果の要約を述べる。

- 1) 従属同期ネットワーク網において、デジタル位相同期ループの位相差平均回数を従属局の階層に応じて変化させることにより、累積ジッタ特性が改善できることを明らかにした⁽¹²⁾。
- 2) 2個の処理システムを有する待ち行列系において、処理速度が異なる場合には、2個のバッファに待機中の呼の差に応じて、呼のルーチングを変化させる、しきい値制御方式を用いることにより、平均待ち時間を小さくできることを明らかにした⁽¹⁵⁾。
- 3) バッファに待機中の呼数に応じて、利用できる処理システムを制限する、しきい値制御方式を用いた場合の、任意の個数の処理システムを有する待ち行列系の解析を行ない、平均待ち時間を与える一般式を導出し、処理システムの処理時間が異なる場合には、しきい値制御方式を用いることにより、平均待ち時間を低減できることを明らかにした⁽¹⁷⁾。
- 4) バッファに待機中の呼数に応じて、利用できる処理システムを制限する、しきい値制御方式を用いた場合の、任意の個数の処理システムを有する待ち行列系の解析を行ない、出力された呼の順序を入力時の順序に並び替えるのに要する並び替え時間を与える一般式を導出し、処理システムの処理時間が異なる場合には、しきい値制御方式を用いることにより、並び替え時間を低減できることを明らかにした⁽¹⁹⁾。
- 5) 2種の呼に対し適応遮断形優先制御を行ったマルチサーバモデルを解析し、バッファでの待時呼数に応じて、即時呼に優先権を与えるサービス数を適応的に変化させることにより、全体の呼損率を小さくできることを明らかにした⁽²³⁾。
- 6) 2個の処理システムを有する待ち行列例において、処理速度が異なる場合には、2個のバッファに待機中の呼数によるしきい値制御方式を用いるだけでなく、呼のルーチング確率を適当に選択することにより、平均待ち時間を更に小さくできることを明らかにした⁽²⁴⁾。

7) しきい値制御方式を用いた任意の個数の処理システムを有する待ち行列系において、複数種類の呼が出力された場合の、呼の並び替え時間の一般的な解析を行った⁽²⁵⁾。

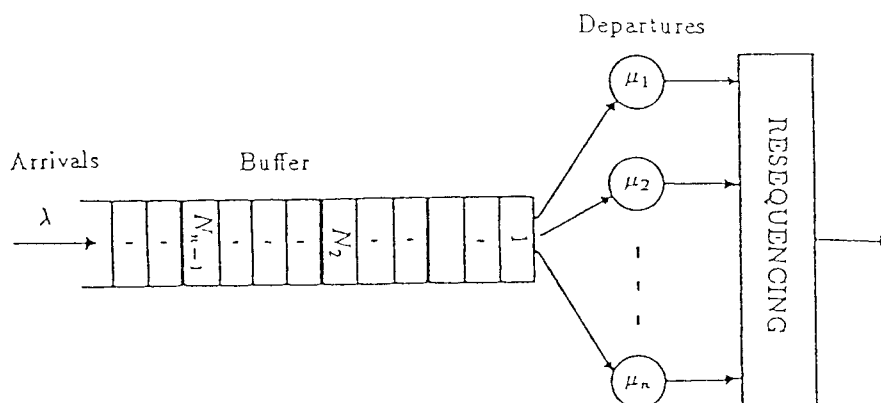


図6 複数の処理システムを有する待ち行列系

8. おわりに

以上、(財)高柳記念電子科学技術振興財団の研究助成を受けて行った研究成果の概要を述べた。これらの研究成果は、電子情報通信学会等の権威ある論文誌に掲載(20編)され、また、世界で最も権威ある国際通信会議等の国際会議(25編)(最近3年間)で講演される等、衛星通信、マイクロ波無線通信、移動体通信の分野において、国内外から大きな注目を受け、高い評価を得ることができた。これらの研究成果を挙げることができ、国内外の研究者と意見の交換をする機会を多くえられたのも、故高柳先生の暖かい励ましと、(財)高柳記念電子科学技術振興財団の多大な御支援によるものである。関係各位に深く感謝の意を表す。最後に、故高柳先生のご冥福を心よりお祈り致します。

参考文献

- (1) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Signal-to-noise ratio of nonlinearity followed by coherent detector and envelope detector", The Trans. of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE), Vol. E71, No. 2, pp. 139-146, February 1988.
- (2) Kuang-Tsan Wu, Iwao Sasase and Kamilo Feher, "On class-IV PRS above the Nyquist rate", IEE Proceedings - F Communications, Radar and Signal Processing, Vol. 135, Pt. F, No. 2, pp. 183-191, April 1988.
- (3) 八嶋弘幸、笹瀬 巖、森 真作、"ブロック分割設定法による相互変調雑音の低減"、電子情報通信学会論文誌 Vol. J71-B. 6, pp. 755-763, 昭和63年6月
- (4) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Improvement of signal-to-noise ratio of the power-law envelope detector by utilizing output harmonic components", The Trans. of the IEICE, Vol. E71, No. 8, pp. 768-774, August 1988.

- (5) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Rejection of multiple CW interference in QPSK systems using decision-feedback filters", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E71, No. 12, pp. 1282-1290, December 1988.
- (6) Iwao Sasase, Jinxing Li and Kamilo Feher, "On digital quasi-impulse shaping for multi-level QAM and QPRS systems", *Canadian Electrical and Computer Engineering Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 31-34, January 1989.
- (7) Toshiaki Ogawa, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Suppression of CW interference and colored noise in QPSK system using decision-feedback filters", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E72, No. 7, pp. 804-810, July, 1989.
- (8) 伊藤俊之、笹瀬 巖、森 真作、"非対称マッピングMulti-h 畳み込み符号化連続位相変調方式"、*電子情報通信学会論文誌* Vol. J72-B-1, No. 8, pp. 658-666, 平成元年 8 月.
- (9) Aminuddin Chalid, Iwao Sasase, Hiroyuki Yashima and Shinsaku Mori, "Coded nonuniform phase/frequency modulation", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E72, No. 8, pp. 903-911, August 1989.
- (10) Hiroyuki Yashima, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Reduced-path Viterbi decoding for optical channel", 1989 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, September 1989.
- (11) Michiko Motono, Hiroyuki Yashima, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Sequential decoding in optical channel", 1989 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, September 1989.
- (12) Minobu Hayashi, Zaihua Luan, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "MS synchronization network using PLL with a variable average number", 1989 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, September 1989.
- (13) Masahiko Takahashi, Hiroyuki Yashima, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Capacity and effects of Reed-Solomon Codes on multi-pulse PPM in optical communications", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E72, No. 11, pp. 1198-1203, Nov. 1989.
- (14) K. Sreenath, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "QAM and QPRS digital broadband cable systems", *International Journal of Digital and Analog Cable Systems*, Vol. 2, pp. 139-148, Dec. 1989.
- (15) Makoto Nakamura, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Two parallel queues with dynamic routing under a threshold-type scheduling", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E73, No. 3, pp. 379-385, March 1990.
- (16) Tadafusa Niinomi, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Selective repeat type-II ARQ/FEC scheme using rate-compatible punctured code", 1990 IEEE International Conference on Communications (ICC/SUPERCOM' 90), April 1990.
- (17) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Analysis of queueing systems with multiple servers under a threshold-type scheduling", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E73, No. 4, pp. 545-553, April 1990.
- (18) 宮城正義、笹瀬 巖、森 真作、"Q P R S システムにおける判定帰還フィルタを用いた正弦波状干渉波および雑音の抑圧"、*電子情報通信学会論文誌*、Vol. J73-A, No. 6, pp. 1066-1074, 平成 2 年 6 月.
- (19) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Resequencing delay for a queueing system with multiple servers under a threshold-type scheduling", *The Trans. of the IEICE*, Vol. E73, No. 6, pp. 928-935, April 1990.

- (20) Tadafusa Niinomi, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "On the insertion of service channel in dicode QPRS system", 1989 International Conference of Communication Technology (ICCT '89), June 1990.
- (21) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Suppressoin of pulsed CW interference in QPSK systems using decision-feedback filters", The Trans. of the IEICE, Vol. E73, No. 7, pp. 1187-1197, July 1990.
- (22) Haruhiko Ito, Toshiyuki Ito, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Multiple trellis coded CPFSK with multi-h scheme", The Trans. of the IEICE, Vol. E73, No. 8, pp. 1366-1371, August 1990.
- (23) Tatsuya Taniiai, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Adaptive cutoff priority for multiple server system with two kinds of arrival streams", The Trans. of the IEICE, Oct. 1990 (to be published).
- (24) Takashi Kojima, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "The effect of varying routing probability in two parallel queues with dynamic routing under a threshold-type scheduling", 2nd Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS '90), Nov. 1990 (to be presented).
- (25) Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "The effect of multiple arrival classes on resequencing delay for a queuing system with multiple servers under a threshold-type scheduling", 1990 International Symposium on Information Theory and Its Applications, Nov. 1990 (to be presented).
- (26) Tomoaki Otsuki, Hiroyuki Yashima, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Punctured convolutional coded PPM in optical channel", 1990 International Symposium on Information Theory and Its Applications, Nov. 1990 (to be presented).
- (27) Hiroyuki Yashima, Iwao Sasase and Shinsaku Mori, "Block division carrier slot setting for satellite SCPC systems", IEEE Trans. on Communications, Dec. 1990 (letter) (to be published).