

## サブテーマ6：

### 雑音と帯域制限を有する高速データシステムのモデル化と試作システムによる評価

#### 研究代表者

[統計数理研究所] 瀧澤 由美

#### 共同研究者

[統計数理研究所] 深澤 敦司, 石黒 真木夫, 佐藤 整尚

[東京大学大学院新領域創成科学研究科] 柴田 直

[国立情報学研究所] 松方 純

#### 1. 研究目標

本研究の目的は、情報化時代の発展を支える高度化公衆情報（通信）システムの実現にある。高度化の具体的内容はデータ伝送の高速化であり、これに伴う消費電力の急激な増大を解決することである。現行商品でも消費電力の抑制は緊急の課題であるが、画像伝送を含めてデータ速度の増大に起因する消費電力量の増大は本来電池の改良等では解決できず、本質的な技術開発が必要である。

これを解決するためには、特に高速データの伝送とそれに伴う消費電力の増大を極小的に抑制する方式および回路、半導体、システムに関わる総合的研究開発が必要である。10年にわたって研究を続けてきた統計数理研究所を中心として、東京大学、国立情報学研究所が連携して以下の各テーマ研究を行い、成果の融合および相互協力によって難問の解決を図る。

(1) マルチユーザ環境下での超広帯域スペクトル拡散通信方式の研究

(2) マルチパス環境下での超広帯域コヒーレント受信方式の研究

(3) システムと半導体回路素子の消費電力の極小化

(4) システムのハードウェアの試作と評価

本研究の成果は、現行のサービス技術を超越して、近未来の公衆移動情報通信サービスを実現する。

## 2. 年次研究計画

### 平成17年度： マルチパス環境下での通信品質・データ速度の解析

移動無線の受信機ではターゲットである単一送信機からの信号は、見通し外都市内伝播チャンネルでは複数のパスを経由して遅延時間が異なる複数の信号として1受信機において受信される。マルチパスを経由した受信信号からエネルギーの大きい複数の成分を検出しベクトル合成することにより、受信信号の信号対雑音比を高めることが出来る。

### 平成18年度： マルチユーザ環境下での選択受信方式の研究

マルチユーザからの信号を分離するためには、大規模行列の高精度、高速データ演算を必要とする。これを可能とする具体的方法について、数学的な立場から検討する。具体的にはCGM(共役勾配法)に着目し、マルチユーザの中からターゲットユーザからの受信信号を選別受信するためのリアルタイム演算システムを構築する。さらにこのシステムモデルについてシミュレーションにより有効性を検証する。

### 平成19年度： システムのモデル化に関する研究

高速データ伝送の目的に対して、劣化諸要素を分析し、これを克服する方法として、擬似見通しモデルを考案した。これはABS(Analysis by Synthesis)法と見なされる。目標システムを実現するためまずマルチパス伝搬成分の精密な推定を行う。具体的には各パス成分の新しい同期方を考案し、振幅・位相情報を正確に抽出する。この情報を基に擬似見通しチャンネルの伝送特性を復元する方式を研究する。

### 平成20年度： システム特性の評価

前年度のモデルを実現する上でまず、マルチパス成分の同期のための大規模行列の超高速関連演算をマッチトフィルタにより実現する見通しを得る。また各パラメータの設計値を得た。従来のW-CDMAに比較して消費電力として100分の1以下を目標とする。

### 平成21年度： モデルおよび実現特性の実システムによる評価(モデル評価)

システムのモデル(帰納)と実現特性(機能)を現物を介して評価するため、ハードウェアの開発と評価を行う。

ソフトウェア無線の実現をコンセプトとしてGate Arrayデバイス(Wired Logic)によるシステムの実現を進める。

### 3 . 平成 1 7 年度の研究進捗

本研究は、マルチパス伝播、マルチユーザ干渉に着目した無線チャネルの数理モデルの構築( 帰納 ) を行い、これに基づくシステム同期とコヒーレント復調、マルチユーザ検波の実現 ( 機能 ) をめざす。さらにデータ誤り率と通信容量の限界と特性改善効果を明らかにする ( 検証 ) 。

以上のコンセプトと戦略に基づき、具体的に下記の研究を進めた。

#### 3 - 1 . システムの劣化機構のモデル化に関する研究 ( 帰納 )

高速データ伝送の目的に対して、劣化諸要素を分析した。マルチパス、マルチユーザ、フェーディングの問題に注目し、これを克服する方法として擬似見通しモデルを考案した。このモデルに基づいてまず、マルチパス伝搬成分の精密な推定を行う。具体的には、各パス成分に対しマッチドフィルタを用いた新しい同期方式を考案し、コヒーレント復調に基づいて振幅・位相情報を正確に抽出する。この情報を基に擬似見通しチャネルの伝送特性が復元される。

#### 3 - 2 . システムの実現特性に関する研究 ( 機能 )

##### ( 1 ) 方式研究

上記の方式モデルに基づいた解析を実現する上でまず、マルチパス成分の同期のための大規模相関演算をマッチドフィルタにより実現する見通しを得た。また各パラメータの設計値をシミュレーションにより得た。

##### ( 2 ) 回路と LSI の研究

高効率演算と低消費電力実現を目的としてアナログ処理 LSI の研究を進めた。

最も高速動作を必要とする同期部において、パラレルマッチドフィルタによる処理を検討し、同期用 LSI の第 1 次試作を行った。従来の W-CDMA に比較して消費電力として 100 分の 1 以下であることがわかった。今後は同期精度の向上について研究を行う。

#### 3 - 3 . システムの実現特性の評価 ( 検証 )

モデルの評価および方式検討結果の照合を目的として、実際のハードウェアを構成する。

平成 1 7 年度は同期部、変復調部についてプロトタイプハードウェアを開発した。干渉チャネルを伴う単一チャネルの実験の結果、64, 128, 256, 512kbit/s の伝送特性を確認した。

## 4. 平成17年度研究成果

### (1) 知見・成果物・知的財産権等

#### (1-1) 研究構想の明確化

本研究の命題を無線データ伝送およびデジタル信号処理の研究の立場からとらえ、研究の課題をマルチパス干渉、マルチユーザ干渉に起因する困難点還元した。このテーマは移動無線通信の開始以来の命題である。

データ伝送速度が低速であった時代には、これらの効果を見逃した架空の単一チャネル単一パス条件でシステムが設計され、これまで基本的な研究がなされなかった。しかし、データ速度が格段の高速化に伴い、これらの要因に基づく顕著な特性の劣化と、データの高速化に伴う消費電力の急激な増大は半導体素子を超えてハードウェアおよびシステムの実現性に重大な困難をもたらす。

この分野においてこの困難を克服し、新しいシステムを提案するためには原点に帰った根本的な対応が必要である。即ち、方式の諸元を実現するための方式とハードウェア(回路と素子)の両分野における研究の進展とともに、それらの相乗的な効果によって問題点を克服することを本研究テーマのコンセプトとした。

本研究テーマの命題とおののに対する解を掲げ、目的とするシステムのモデル化(帰納)を図1に示す。本研究の目的とする成果は図1下の出力(機能)として記している。図1の中央部は命題、解、モデルによって実現し得るデータ伝送システムの特徴を表現している。

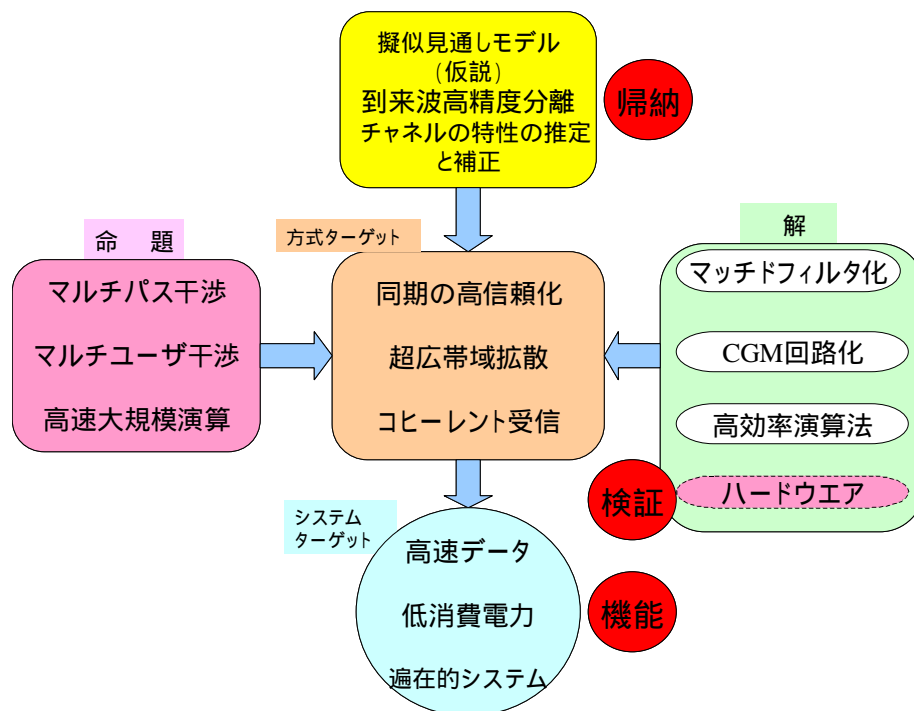


図2 本研究の内容と戦略

( 1 - 2 ) 研究の内容と方式の構成

研究の具体内容としてまず無線伝播路で生じる問題について検討し、命題を明確化した。これを図2に示す。

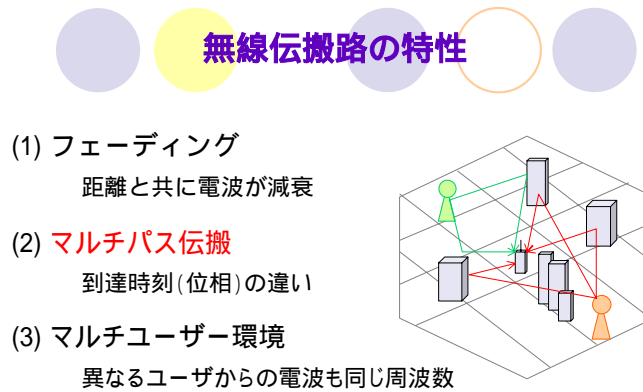


図2 無線伝播路で生じる問題

i) 正確で信頼度の高い同期方式の研究

実際のシステムは各地域をカバーする多数のセルと各セルに設置される無線基地局(BS)よりなる。移動局(PS)は各セルを通過するに伴い、対応する基地局(BS)を選定し通信する。BSとPSは通信するにあたって相互に同期を取る必要がある。同期とは通信に必要な制御信号と、情報を通信するトラフィックス信号が時間軸上に存在する時刻を検出し、その時刻を基準として信号の送受信および送受信機内の全ての信号処理の演算を行う。この目的のためにマッチドフィルタの研究を行った。

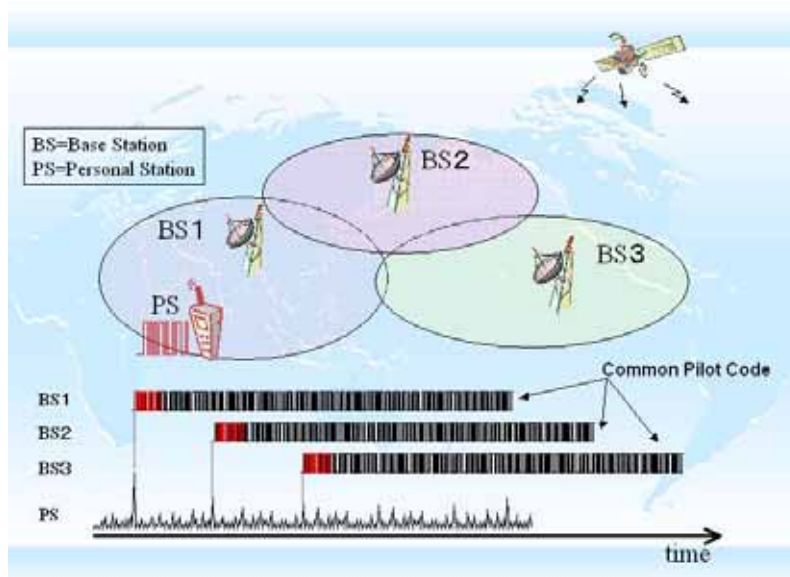


図3 基地局間同期と基地局 移動局同期

ii) 超広帯域信号のコヒーレント伝送の研究

無線通信において信号は送信側で位相変調が行われ、受信においては伝播路による位相特性の劣化を補償し、受信信号の正確な位相の検出を行う。特に信号が超広帯域であるために、わずかな誤差が特性劣化の支配的要因をもたらす。この問題の克服のために本方式ではパイロット信号を常時伝送し、これを受信する系において超広帯域信号の伝播路の特性の正確な推定とその補償を行う方法の研究を行った。

iii) マルチユーザ干渉除去

無線システムは全てのユーザが同一の無線搬送波を用い、送受信を行う。そのためにターゲットとする送信機からの受信信号以外の全ての受信信号の除去が望まれる。これに対してマルチユーザ検波法の研究を必要とする。この命題には大規模な数値行列の高速演算が求められる。本研究では独創的な方式としてCGMによる数値行列の高効率演算法の研究を行った。

iv) システムの構成

無線システムの構成案を図3に示す。送信部(図4上)では情報源からのメッセージは情報源符号化、無線チャネル符号化(誤り訂正符号化)、および変調部よりなる。変調部ではベースバンド変調(step1)としてスペクトル拡散変調、無線変調(step2)として4相位相変調(QPSK)を行う。受信部(図4下)では送信側と逆操作が行われる。

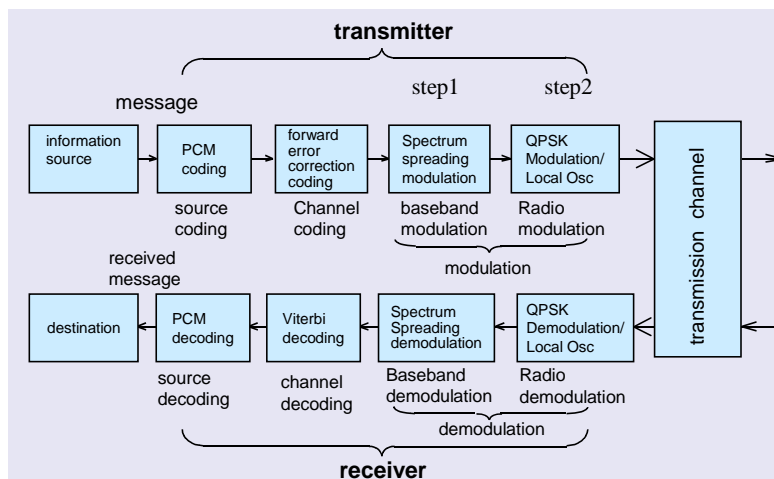


図4 無線システムの構成

v) 方式評価のためのプロトタイプハードウェアの開発

本年度は Forward Link(基地局 移動局)の試作開発を行った。第1次試作のハードウェアの外観図を図5に示す。右の空白部は第3次開発予定の Reverse Link(移動局 基地局)用である。

論理回路および数値演算デバイスは内蔵するソフトウェアによって制御され動作する。伝送帯域幅 5MHz のときデータ速度として1チャンネルあたり 64, 128, 256 および 512 kbit/s の入力で eye pattern の開孔が確認された(図6)。

方式シミュレーションではデータ速度 1 Mbit/s での動作が予測されており、そのための改良設計を進めている。



図5 ベースバンド部プロトタイプハードウェア

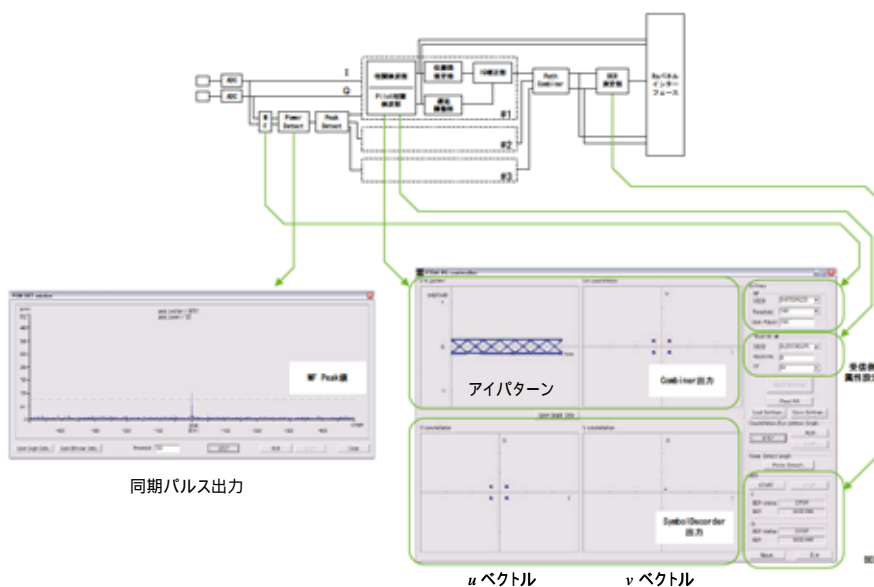


図6 プロトタイプハードウェアの各部の動作

vi) アナログ演算による極低消費電力 LSI の実現

本研究の中で開発試作した同期用 LSI を図 7 に示す。

(A) セル同期への適用

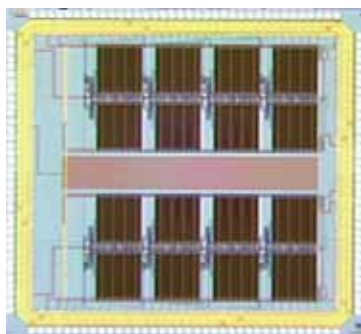
この回路では入力信号とレプリカ(候補符号)信号との間の相関演算を行う。相関演算のピーク出力をそれぞれの同期出力とする。

セル同期においては入力信号 4.096Mchip/s の 1 chip あたり 1sample として相関演算を行う。さらにレプリカ信号として 20msec の周期を有する PN 符号の 5msec ごとに分割し、それらを同時に 4 つのセクションに入力する。それらの出力の中で最大のピーク値を有する成分を Winner-Take-All 方式で検出し、同期出力とする。

この演算は I 成分と Q 成分各々について同時に並列演算を行う。図において上部は I 成分の 5msec ごとの 4 演算部を、また下部は Q 成分の 5msec ごとの 4 演算部を担当する。

(B) パス同期への適用

パス同期においては入力信号 4.096Mchip/s の 1 chip あたり 4sample として 1/4 位相ごとの相関演算を同時に行う。各々の相関長は 256tap で、それぞれを 4 並列同時に演算し、合計相関長として 1024tap を得る。これによって相関演算長は  $256\text{tap} \times 4 = 1024\text{tap}$  とし、これを 1/4chip ずらした 4 成分について並列演算を行う。



©University of Tokyo

図 7 同期用 LSI の外観図

相関器は  $256\text{tap} \times 4$  位相  $\times 4$  区間  $\times 2$  成分よりなる。



## ( 2 ) 成果発表及び著書執筆等

Yumi Takizawa, Cindy Bernadeth Tjitrosoewarno, and Atsushi Fukasawa, "A Mathematical Scheme of Multi-User Receiver in W-CDMA Mobile Communication based on the Conjugate Gradient Method," WSEAS Transactions on Signal Processing, Issue 2, Vol.1, November 2005, pp.244-248, 2005.

Cindy B. Tjitrosoewarno, Atsushi Fukasawa, Yumi Takizawa, "Multi-user Receiver Using Conjugate Gradient Method for Wideband CDMA," Proc. on IEEE ISCAS, pp.360-363, May 24, 2005.

Tomoyuki Nakayama, Toshihiko Yamasaki, and Tadashi Shibata, "A Low-Power Switched-Current CDMA Matched Filter Employing MOS-Linear Matching Cell and Output A/D Converter," Proc. on IEEE ISCAS, pp.5365-5368, May 24, 2005.

Shigenori Tani, Cindy B. Tjitrosoewarno, Atsushi Fukasawa, Tomoko Kashima, Yumi Takizawa, "Multi-path Signal Receiver with Parallel Matched Filter for the W-CDMA Systems," WSEAS Transactions on Information Science and Applications, Issue 3, Volume 1, pp.937-941, 2004.

Tani. S., Tjitrosoewarno C. B., Sugihara H., Fukasawa A., Takizawa Y., "Enhancement of the W-CDMA Scheme based on Parallel Matched Filters," WSEAS Transactions on Communications, Issue 5, Vol. 4, pp. 211-215, May 2005.

Y. Arai, K. Igarashi, A. Fukasawa, Y. Takizawa, "Multi-User Detection to Enhance Capacity of W-CDMA based on the Conjugate Gradient Method," Journal on Circuits, Systems, and Computers, vol.13, No.2, pp.313-323, 2004.

Y. Iijima, S. Inoue, T. Kashima, A. Fukasawa, Y. Takizawa, "Coherent SS Modulation with Estimation and Compensation of Phases Rotation using Pilot Channel," Journal on Circuits, Systems, and Computers, vol.13, No.2, pp.361-373, 2004.

## 5 . 研究成果デモ

2006年3月15日に、研究部門・管理部を含む所内を対象とし、研究内容を知ってもらくと同時に共同研究者および協力会社の研究成果の相互確認と今後への方向付けを目的として、研究成果デモを開催した。

会場では、まず研究の全体像と戦略が説明され、続いて W-CDMA の第 2 世代方式、先行研究と受賞の歴史、マッチドフィルタ LSI チップなどについて順次平易な説明がなされた。特に、当研究所によるプロトタイプハードウェアの展示では、実際の動作デモと各部の特性のモニターシステムによるリアルタイム観察が紹介された。

デモ形式によるプレゼンテーションの試みは初めてであったが、従来の研究会形式と異なり、見える形でのハードウェアの実際の動作や LSI 展示は新鮮で有意義なものとなった。これを通して幅広い理解と高い評価が得られた。



図1 研究の戦略とデモの主旨の全体説明  
と特性のモニタの説明



図2 プロトタイプハードウェアの動作

### 〔参考文献〕

- ・ 無線データ通信研究会編、深澤敦司他 著、「 情報ネットワーク技術 無線データ通信入門 入門解説」、(株)ソフト・リサーチ・センター
- ・ 服部武 訳、Vilay K. Garg, Kenneth Smolik, Joseph E. Wilkes 著、「CDMA セルラー移動通信システム」科学技術出版