

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249056

研究課題名(和文) 環境適応型ベースバンド無線の研究

研究課題名(英文) Study on Adaptive Baseband Radio

研究代表者

唐沢 好男 (Karasawa, Yoshio)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：40313407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：電波領域にある高周波帯域の信号そのものもベースバンド信号として扱い、全帯域を共有して周波数空間を自由自在に活用するワイヤレスシステムのコンセプトを「環境適応型ベースバンド無線」と呼び、無線通信のパラダイムシフトに挑戦した。具体的には、二次利用者システムを想定し、スペクトル拡散ベースの低電力密度環境適応型ベースバンド通信方式を提案し、その伝送特性を明らかにした。これによって、環境適応型ベースバンド無線が有効に機能する一つの形を示すことができた。また、これに関連する要素技術である広帯域受信に伴う受信機飽和問題とその対策、通信環境・電波環境の認知技術について、研究しその成果を得た。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a concept of “adaptive baseband radio” as a pioneering wireless transmission system to open a vista shifting away from the long-lasting Marconi paradigm. The proposal adopts the principle of baseband orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) to enable the spectrum to be controlled freely for realizing “band-free communications”. An experimental system was constructed and a demonstration experiment was implemented under a multipath-rich environment. The adaptive baseband radio proposed here is a system integrated with functions of cognitive radio and software-defined radio, which exhibit a promising potential.

研究分野：無線通信工学

キーワード：環境適応通信 ベースバンド無線 コグニティブ無線 ソフトウェア無線 低電力密度通信

1. 研究開始当初の背景

無線通信では、送りたい情報をベースバンドで作成し、これを高周波にアップコンバートしてアンテナから送り出す方式がマルコーニ以降100年間続いている。デジタル信号処理機能(演算機能・速度・メモリ)がより高度になる近未来においては、無線機が電波そのものをデジタル信号処理で直接に作り出し、すなわち、高周波帯域の信号そのものもベースバンド信号として扱い、全帯域を共有して周波数空間を自由自在に活用するワイヤレスシステムの時代になると期待できる。このような、新たな時代の無線通信システムのコンセプトと、それを実現する要素技術の確立が求められている。

ベースバンド信号を直接伝送するという意味ではUWBの一方式として分類される「インパルス無線」があるが、レーダー技術をベースとした特殊無線であって、スペクトル制御が難しく、通信の本流にはなりえない弱点がある。

2. 研究の目的

高周波帯域の信号そのものもベースバンド信号として扱い、全帯域を共有して周波数空間を自由自在に活用するワイヤレスシステムのコンセプトを「環境適応型ベースバンド無線」と呼び、次の100年を視野に入れた無線通信のパラダイムシフトに挑戦する。全ての機能をソフトウェアプログラミングで実現する「ソフトウェア無線」・環境認知機能を身につけ適応変身する「コグニティブ無線」・電波領域の信号をベースバンド感覚で捉える「ベースバンド無線」という「3つの無線(Three Radios)」の融合を、将来の姿と捕らえ、この先進的ワイヤレスシステム「環境適応型ベースバンド無線」の研究開発を行う。

提案するベースバンド無線は、柔軟なスペクトル制御(周波数領域パケット通信)を可能とし、近未来での情報通信の本流を狙う。このコンセプトを形にして、未来通信のイメージを世に問うことを目標とする。これまで、情報通信の根幹技術は、欧米(特に米国)に負うところが大きかった。この研究によってオリジナル概念を構築し、世界に向けたワイヤレス情報通信の根幹技術を生み出すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究テーマに関する概念提案と、予備的な基本伝送実験については、すでに着手しており、その先行研究をベースに、そこで浮かび上がる問題を含めて、研究を進展させるた

め、以下の項目に取り組む。

1) ベースバンド無線のコンセプト確立と基本機能実証

ベースバンド無線の特徴を生かした種々の通信方式の提案を行う。その提案方式の特性を計算機シミュレーションで評価するとともに、実験系を構築して、有効性を実証する。実験系におけるマルチパス環境生成は、本グループが試作して所有している電波反射箱を用いる。

2) 全帯域一括復調に伴う受信機飽和問題・非線形問題の解析と対策技術

ベースバンド無線は、超広帯域信号を待ち受ける受信系であるため、待ち受け帯域内に強い干渉波が入力すると、受信系が飽和し、混変調や相互変調による信号劣化が起きる(受信機の非線形問題)。この劣化の定量的な評価と、その劣化対策の提案を行う。評価は計算機シミュレーションを主とするが、原理の確認実験も行う。

3) 通信環境・電波環境の認知技術

ベースバンド無線は、環境の変化に適応変身して良好な通信を維持する無線方式であるため、電波環境(伝搬環境や干渉波信号の性質)のリアルタイム認識が必要になる。環境適応性を実現する環境認知技術(コグニティブ無線技術)である。この具体的な方法について研究する。

4. 研究成果

1) ベースバンド無線のコンセプト確立と基本機能実証

ベースバンド無線信号の生成に関する周波数領域の表現と時間領域の信号表現の関係を図1にまとめている。同図(a)は送信信号として使用できる周波数帯域を示している。ベースバンド信号の帯域制御は、OFDM方式を採用する。信号帯域をサブキャリア間隔で分割し、各サブキャリアに送信信号シンボル(BPSK, QPSK等)を割り当てる。(a)は $f_{min} \sim f_{max}$ 内のサブキャリアに、任意に信号を割り当てるイメージである。(b)では、その2倍の周波数($2f_{max}$)を想定し、後半部分は空白(0V信号)にする操作を示している。このブロックデータをIFFT処理し、その実数部を送信信号とする。その時のスペクトルが同図(c)である。この時間信号をそのままDA変換し、アンテナから送出する(同図(d))。受信側も同様に、電波信号をそのままAD変換、FFT処理によって一括復調を行う。

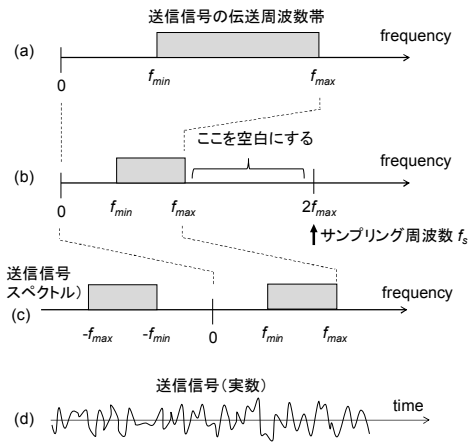


図1 ベースバンド OFDM の信号生成法

本提案では、周波数利用の空き帯域、いわゆる“ホワイトスペース”を利用する環境適応型ベースバンド無線を提案した。図2はその提案方式である。ここでは、これを、周波数領域パケット通信 (Frequency-Domain Packet Communication: FDPC) と呼んだ。この方式が力を発揮するのは、周波数領域においても、また、時間領域においても選択性フェージングとなる過酷な伝搬環境においてであり、この伝送特性を明らかにした。

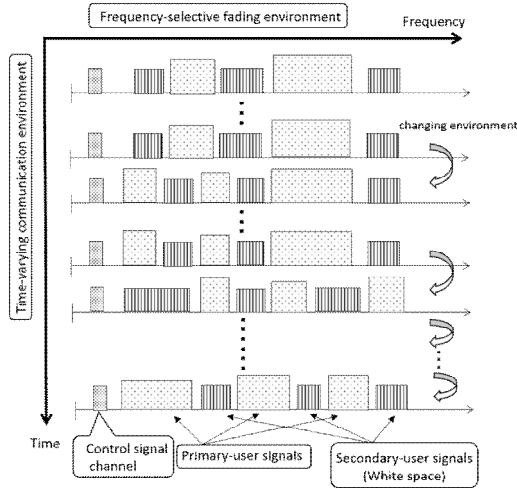


図2 周波数領域パケット通信イメージ

つぎに、ベースバンド無線の特徴を活かす方式として、セカンダリユーザ (SU) 向け通信として、周波数領域でのスペクトル拡散型低密度伝送ベースバンド無線の通信方式を提案した。プライマリユーザ (PU) が存在する環境において、その高周波帯全部に横たわる空き周波数帯群 (ホワイトスペース) の全部を一括に使って伝送する方式である (図3)。周波数帯域を拡散することによって、例えば、拡散利得を 1000 (=30dB) にすれば、拡散しな

い場合と総電力を同じにすれば、平均電力密度は 1/1000 近くになり、他のシステムへの与干渉のリスクをさらに小さくできる。また、図4のように、周波数選択性フェージング環境の中で、OFDM の信号 (W_{sig} , W_{sp}) を遅延スプレッド σ_τ に対して、最適に設計することによって、拡散利得以上の低電力密度効果 (例えば、BER: 10^{-4} ラインで、50dB に近い低電力密度化効果) を得ることができた (図5)。

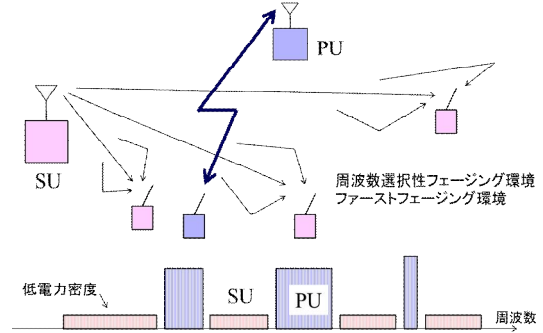


図3 分散する空き帯域群を低電力密度で一括して利用する SU システム

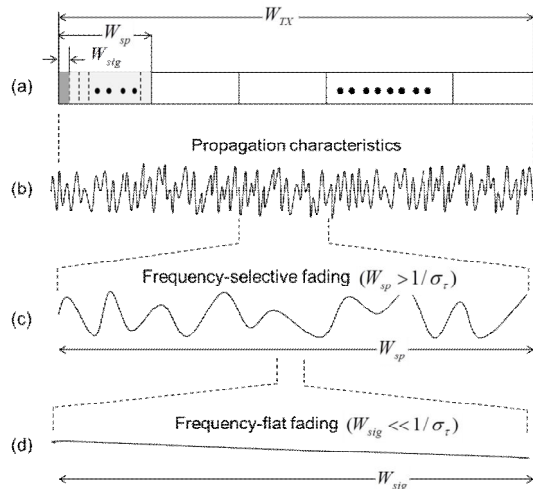


図4 周波数拡散に関するキーパラメータ W_{sig} , W_{sp} , W_{TX} と σ_τ の関係

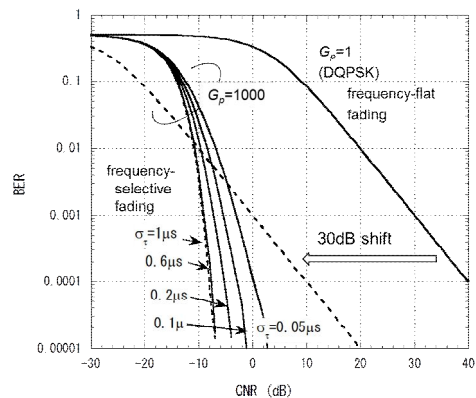


図5 $G_p=1000$ での BER の $\sigma_\tau W_{sp}$ 依存性 ($W_{sp}=10\text{MHz}$ に固定)

研究では、さらに、マルチユーザへのシステム拡張提案を行った(図3のイメージ)。ポイントは、ユーザ毎に伝搬環境(=遅延スプレッドの大きさ)が異なり、信号設計が難しくなるが、図6のような信号設計の工夫を採り入れて、図7のような良好な特性を実現する方法を得た。

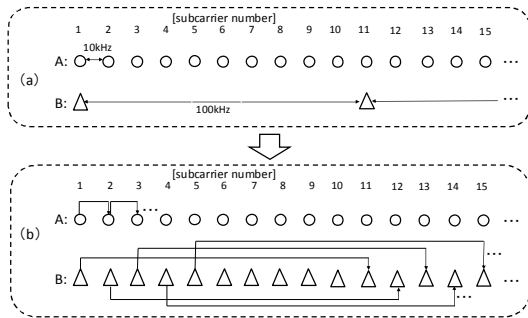


図6 ユーザごとに遅延スプレッドが異なる環境における信号フレーム構成法

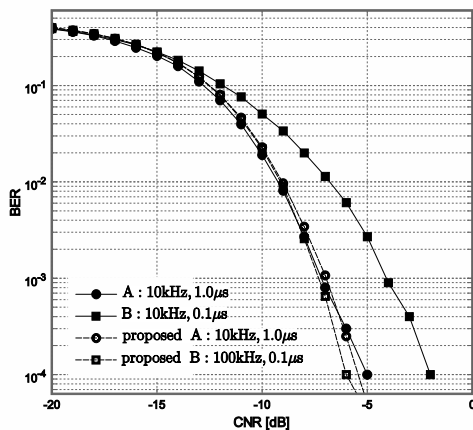


図7 2ユーザ(A, B)での伝送特性

(●、■は対策なしで、最適設計ができないBが劣化している。これに対して、提案法(○、□)によって、A, B共に良好な特性が実現している。)

ここでは、提案方式の評価に計算機シミュレーションでの結果を示したが、原理の確認を行うために、マルチパス環境を実現する電波反射箱での実験評価も行った、図8はこの構成を示している。実験では、1GHz~2GHz付近に情報を置く通信を実現した。そのため4GHz以上のサンプリング速度のDAC, ADCを用いた。アンテナには、比帯域(帯域幅/中心周波数)の大きいアンテナが必要のため、独自に開発した比帯域66%のプリントダイポールアンテナを用いた。ここでは実測値との比較データは割愛するが、動作の原理確認を行うことができた。

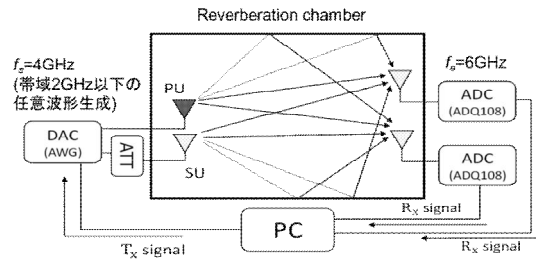


図8 環境適応型ベースバンド無線の実験系(PUとSUが混在する環境でのマルチユーザ伝送を対象とした)

2) 全帯域一括復調に伴う受信機飽和问题・非線形問題の解析と対策技術

RF回路の非線形の無線信号への影響をベースバンドで補償する方法は有望な方法であるが、複数のアンテナを用いるビームフォーミング送受信では、この非線形補償の回路規模が大きくなるという問題があった。これに対し、ひとつの非線形補償器で複数の送信機の補償を共通として行った場合の効果も、送信機の非線形モデルを用いて詳細に検討した。また、非線形問題を引き起こす強い干渉波を簡易に特定する方法を考案し、この方法に基づき、受信系フロントエンド段階で非線形問題を回避する方法を検討した。

図9は、強い干渉波が入射したとき、環境認識結果に基づくアダプティブノッチフィルタが働き、そのノッチフィルタの特性が所望信号に対して劣化をもたらすときには、所望信号の周波数を移動させる方式の原理図であり、図10はその結果である。このようにして、非線形問題を解決する方法を実現した。

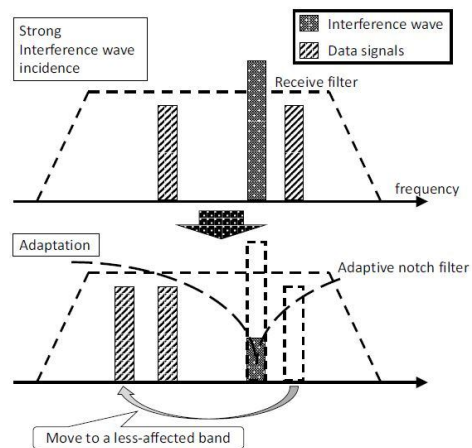


図9 アダプティブノッチフィルタと通信信号制御による非線形問題対策のイメージ

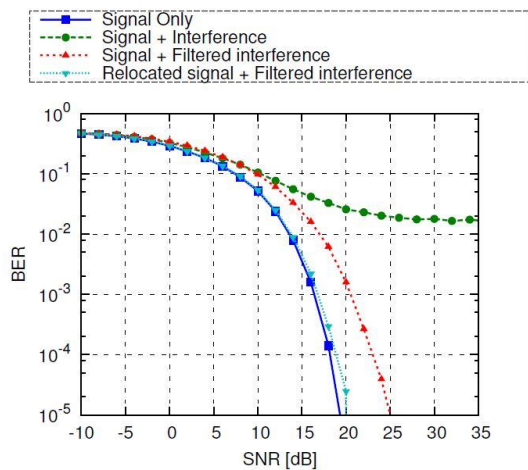


図 1 0 環境適応制御による干渉波抑圧対策の効果 (■所望信号のみ、●干渉波入射、▲ノッチフィルタ適用、▼ノッチフィルタ+信号周波数移動)

3) 通信環境・電波環境の認知技術

通信環境、電波環境の認識技術として、複数のノードを用いた観測情報を補間し、その結果をもとに周波数共用条件を決定する手法について検討した。ここでは、補間法としてクリギング法に基づく手法を採用することで、精度の高い補間の実現が可能となった。加えて、電波のホワイトスペースの有用性を評価する指標についての検証を行った。

また、2)で述べた非線形問題解決のためにノッチフィルタを用いる方法では、干渉波の周波数を正確に特定する必要がある。これに対して、2台の低速ADCで、一方に遅延素子を入れ、同期してアンダーサンプリングする方法により、干渉波周波数を簡易に推定する手法を提案した(図11)。

ここでは、干渉波が所望波より十分強いという性質を利用して、干渉波の中心周波数を簡易に求める計算法を提案した。これは、強い信号に重みづけして干渉波周波数を浮き上がらせる方法であるが、重みファクタ α の依存性がある。典型的ないくつかのケースについて調べた結果、 $\alpha \geq 2$ 以上で十分な精度となることが確かめられた(図12)

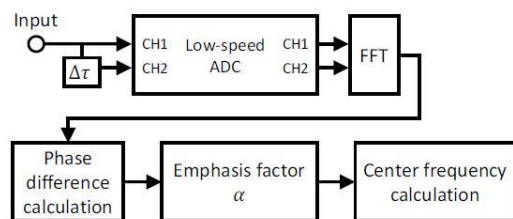


図 1 1 アンダーサンプリングによる干渉信号周波数の簡易特定方式

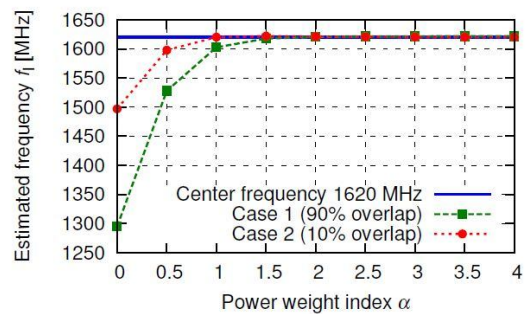


図 1 2 干渉波の周波数特定結果 (f=1620MHz が設定値)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) Y. Ma, Y. Yamao, Y. Akaiwa and C. Yu, "FPGA Implementation of Adaptive Digital Predistorter with Fast Convergence Rate and Low Complexity for Multi-Channel Transmitters," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.61, no.11, pp. 3961-3973, Nov. 2013.
- (2) Y. Ma, Y. Yamao, K. Ishibashi and Y. Akaiwa, "Adaptive Compensation of Inter-Band Modulation Distortion for Tunable Concurrent Dual-Band Receivers," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.61, no.12, pp.4209-4219, Dec. 2013.
- (3) S. Pasingi, K. Nakada, A. Kosako and Y. Karasawa, "Performance Evaluation of MIMO Channel Model for Simplified OTA Test Systems," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, DOI:10.1186/10.1186/1687-1499-2013-285, Dec. 2013.
- (4) D. T. Le, N. Q. Dinh, and Y. Karasawa, "A New Scheme to Enhance Bandwidth of Printed Dipole for Wideband Applications," IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no. 4, pp. 773-782, 2014.
- (5) Y. Karasawa, I. Oshima, F. Tamrin, Y. Sakamoto, R. Arif, and K. Sasaki, "Fundamental Propagation Characteristics of Stirrer-less Reverberation Chamber for MIMO-OTA Measurements," IEICE Trans. Commun., vol. E97-B, no. 10, pp. 2083-2092, Oct. 2014.

- (6) Z. Sun, D. Tian, X. Ning and Y. Yamao, "Parameter Estimation Technique for the SNCK Scheme Based on the Spectral-Correlation Density," Springer Wireless Personal Communications, vol. 80, no. 3, DOI 10.1007/s11277-015-2296-3, Feb. 2015.
- (7) T. Kosugi, T. Fujii, "Efficient Spectrum Sharing with Avoiding Spatial Fragmentation of White Space," ICT Express, vol.1, no.2, pp.55-58, Sept. 2015.
- (8) J. Nakazato, D. Okuyama, Y. Morimoto, and Y. Karasawa, "Frequency-Domain Differential Coding Schemes under Frequency-Selective Fading Environment in Adaptive Baseband Radio," IEICE Trans., Commun. vol. E99-B, no. 2, pp. 488-498, 2016.

[学会発表] (計 29 件)

- (1) J. Nakazato, Y. Morimoto and Y. Karasawa, "DSFBC Transmission Scheme with OFDM in Adaptive Baseband Radio," European Wireless 2015, Budapest Hungary, 20-22 May, 2015.
- (2) 唐沢好男, [特別講演] "ベースバンド無線: 研究への夢と理想と現実と," 電子情報通信学会 SR 研究会, SR2015-75, pp. 19-26, 2016. 01.

他

[図書] (計 1 件)

- (1) 唐沢好男, 改訂: デジタル移動通信の電波伝搬基礎、コロナ社, 2016. 03.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.radio3.ee.uec.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

唐沢好男 (KARASAWA Yoshio)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科
教授
研究者番号: 40313407

(2) 研究分担者

藤井威生 (FUJII Takeo)
電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニ

ケーション研究センター・教授
研究者番号: 10327710

山尾 泰 (YAMAO Yasushi)
電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニ
ケーション研究センター・教授
研究者番号: 10436735