

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00122

研究課題名(和文) OFDMベースバンド伝送方式を活用した無線ネットワークの広域化・低消費電力化

研究課題名(英文) Wide area and low power consumption of wireless network using OFDM baseband transmission

研究代表者

笹森 文仁 (Sasamori, Fumihito)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：70298090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年注目を浴びている可視光や超音波を媒介とした無線ベースバンド伝送方式は電波を用いないため、例えば災害時などに無線局免許無しで容易に無線ネットワークの構築が可能である。本研究では、新しいOFDMベースバンド伝送方式を提案し、コンピュータシミュレーションならびに、マイコン開発ボードやシングルボードコンピュータ、スマートフォンを活用した伝送実験により、提案方式は無線ネットワークエリアの広域化ならびに送受信機の低消費電力化に有効であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の提案方式は、広域化・低消費電力化といった目的を達成するための特別なハードウェアは必要とせず、無線回線の状態に応じて方式設計パラメータを適応的に変更するといった制御がソフトウェア(信号処理)だけで可能となる。本方式は音の帯域を用いたOFDM信号を生成でき、信号処理量も小さいことから、低価格で小型なマイコン開発ボードやシングルボードコンピュータにも実装可能である。電波利用が制限されている場所において光や超音波を媒介とした無線ネットワーク構築も可能であることから、本方式は無線ネットワークを必要としている様々な環境に対して柔軟な回線設計に寄与することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The wireless baseband transmissions using visible light or ultrasonic waves, which has been attracting attention in recent years, do not use radio waves. Then it is possible to easily construct a wireless network without a radio station license in the event of a disaster, for example.

In this research, a new method of the OFDM baseband transmissions is proposed. It is clarified through computer simulation and transmission experiments using a microcomputer development board, a single-board computer, and a smartphone that the proposed method can make the wireless network area wider and the power consumption of the transceiver lower.

研究分野：無線通信工学

キーワード：OFDM 無線センサネットワーク 広域化 長寿命化 低消費電力化

1. 研究開始当初の背景

スマートフォン利用者が全世界的に急増し、移動通信システム回線の超高速化・大容量化が急務となっている。一方、温度や湿度などの環境情報を収集・管理するシステムや、子どもの安心・安全や健康増進のための情報を収集・管理するシステムも非常に注目を浴びている。後者のような無線センサネットワークシステムでは、送受信する情報はテキストデータが中心であるために高速化・大容量化の必要性はあまり無く、情報をより広範囲に伝達させるための無線ネットワークエリアの広域化や、システムを長時間利用できるような長寿命化(低消費電力化)の方が重要課題となっている。

携帯電話や Wi-Fi など で採用されている直交周波数分割多重 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing: OFDM) 方式では、図 1(a)のように単一のチャネルを用いて信号を直列的に高速伝送するのではなく、同図(b)のように直交している複数のチャネルを用いて信号を並列的に低速伝送する。各チャネルが半分ずつ重なることでチャネル全体の周波数帯域幅がシングルキャリアの約半分で済むため、回線利用効率(周波数利用効率)が優れている。同方式は無線センサネットワーク向けの規格 Wi-SUN でもオプションとして規定されている。一般の OFDM 方式は、図 2(a)のように  $N$ 個の直交チャネルで  $N$ 個の信号  $S_1 \sim S_N$ を送信するのに対して、エルミート対称符号化 OFDM 方式は、同図(b)のように  $N/2$  個の信号  $S_1 \sim S_{N/2}$ を 2つの直交チャネルで送信する。すなわち、回線利用効率は犠牲になるものの、受信側で 2つの信号を合成・復調できるため、伝送品質が改善する(電力利用効率が向上する)のが利点である。

エルミート対称符号化 OFDM 方式のもう一つの特徴として、OFDM 信号が実数成分のみとなる点が挙げられる。一般の OFDM 信号は複素信号のため、電波の  $\cos$  成分と  $\sin$  成分を用いて OFDM 信号の実数成分と虚数成分をそれぞれ伝送する必要があるが、本方式を採用すると、電波を用いる必要が無い。近年注目を浴びている可視光や超音波を媒介とした無線ベースバンド伝送方式は電波を用いないため、例えば災害時などに無線局免許無しで容易に無線ネットワークの構築が可能である。

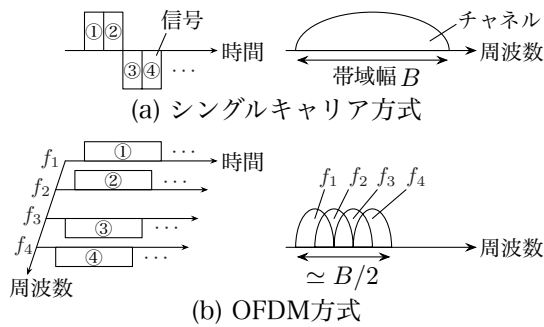


図1 OFDM方式の概念図

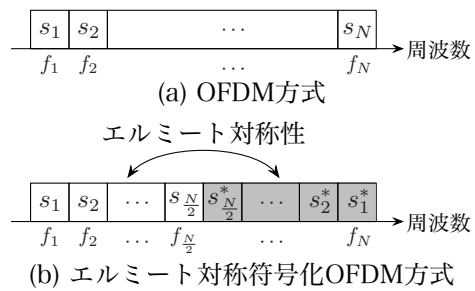


図2 エルミート対称符号化方法の概念図

2. 研究の目的

本研究では、無線ネットワークエリアの広域化および送受信機の長寿命化(低消費電力化)に主眼を置いた新しい OFDM ベースバンド伝送方式 (エルミート対称符号化 OFDM 方式) を提案する。提案方式は、送受信機のハードウェアを改良すること無く、ソフトウェア(信号処理)のみで電力利用効率を向上できることが特徴である。コンピュータシミュレーションならびに、マイコン開発ボードやシングルボードコンピュータ、スマートフォンを活用した伝送実験によって提案方式の電力利用効率ならびに回線利用効率を明らかにし、無線ネットワークエリアの広域化および送受信機の低消費電力化の観点から提案方式の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 計算コストの低減(送受信機の低消費電力化にも寄与)を重視した符号化方法に関する検討

無線ネットワークエリアの広域化・低消費電力化が見込める スペクトル拡散技術(M-ary SS方式) に焦点を絞り、同方式を OFDM ベースバンド伝送方式に適用したときの電力利用効率の特性について、様々な無線回線状態を想定したコンピュータシミュレーションを用いて検討する。短い拡散符号長を用いたスペクトル拡散技術を応用すると、計算コストを低く抑えつつ電力利用効率が向上する。従来方式と同一の受信電力で伝送品質(ビット誤り率)を改善できる 電力利用効率の向上効果は、送信機の送信電力を低減させて同一の伝送品質を担保できる 送信機の低消費電力化と等価であり、送信電力を維持して同一の伝送品質を担保できる伝送距離を延ばす 無線ネットワークエリアの広域化とも等価である。送受信機の設定パラメータと無線回線の状態パラメータを各種変化させたときの電力利用効率について、コンピュータシミュレーションを用いて定量的に評価する。

(2) デジタル変調の多値化方法に関する検討

送受信機間が近距離で済む無線ネットワークの場合は、受信電力が十分に確保できるため、デジタル変調の多値化によって回線利用効率を向上させることが可能となる。そこで、電力利用効率に重点を置きつつも、回線利用効率を効率良く向上させる手法を提案する。提案方式の電力利用効率と回線利用効率のバランスに関して、コンピュータシミュレーションを用いて定量的に評価する。

(3) 無線ネットワークエリアの広域化および送受信機の低消費電力化に関する実証実験

実世界とサイバー空間が相互連携した社会（CPS/IoT 社会）に対する期待は様々であり、必要とする無線ネットワークの形態も様々であることから、(1)と(2)のコンピュータシミュレーションで明らかにした提案方式の有効性を実験的に検証するために、様々な環境を想定した実証実験を実施する。無線ネットワークを柔軟に構築することを目的として、可視光伝送系、FM 伝送系、音波・超音波伝送系の3種類の無線伝送系を構築する。また、無線センサネットワークを視野に入れた送受信端末として、廉価なマイコン開発ボードやシングルボードコンピュータ、Android 端末（スマートフォン）を準備し、各端末に OFDM 信号処理を実装して実証実験を実施する。

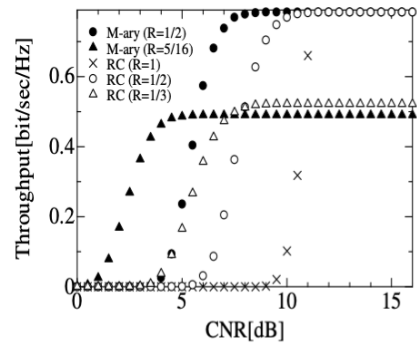
4. 研究成果

(1) 計算コストの低減（送受信機の低消費電力化にも寄与）を重視した符号化方法に関する検討

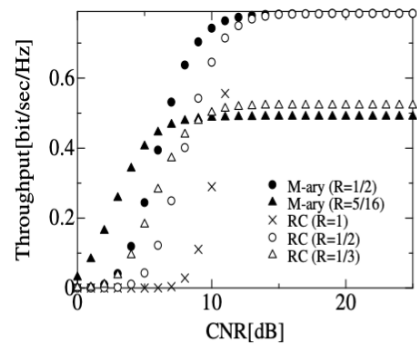
スペクトル拡散技術の一つである M-ary SS 方式は、情報  $B$  ビットのパターンに応じて  $2^B$  種類の直交符号の中から 1 つの符号を選択して送信する方式である。受信側では、受信した符号に対して全種類の符号との相関処理を施し、相関が一番強い符号を検出して情報  $B$  ビットを復元する。情報ビット数 ( $B$  ビット) を増加させることで符号長 ( $2^B$  チップ) は指数関数的に増加し、相関処理の特徴により電力利用効率は飛躍的に改善する。しかしながら、符号長に対する情報ビット数の割合（伝送レート）が急激に低下するとともに、相関処理の計算コストが増加するという欠点がある。さらに、無線回線は伝搬による減衰や建造物による回折・反射により伝送ひずみ（フェージング）が発生し、雑音の影響も相まって、回線状態により伝送特性が大きく変動する。

以上の点に鑑みて、本研究では、信号処理の計算コストを低く抑えつつ電力利用効率を向上させることに重点を置き、符号長が短い 8 チップと 16 チップの符号を採用した。伝送レートは、前者は 1/2 に、後者は 5/16 に低下する。提案方式の有効性を検証するため、繰り返し符号化（Repetition Coding: RC）OFDM 方式を比較対象とし、繰り返し回数を 2 回と 3 回（伝送レートはそれぞれ 1/2、1/3 に低下）に設定してスループット特性を比較した。本報告では、無線回線状態として、熱雑音、仲上-ライスフェージング（ライスパラメータ 10dB）、レイリーフェージングの 3 種類の無線環境下を想定して比較・検討した。その結果を図 1 に示す。

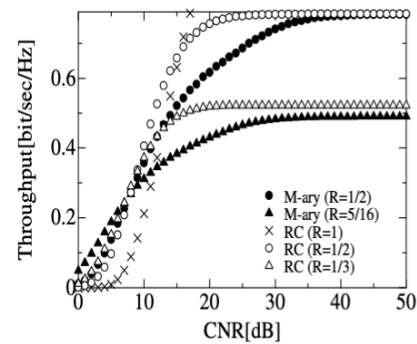
同図から、電波伝搬が安定的な環境である熱雑音環境下および仲上-ライスフェージング環境下では、提案方式の方が常に良好なスループット特性を示している。熱雑音環境下で最大約 3dB、仲上-ライスフェージング環境下で最大約 2.5dB の電力改善効果が確認できた。一方、電波伝搬が劣悪な環境であるレイリーフェージング環境下では、搬送波対雑音電力比 CNR が 6dB 以上になると従来方式の方が良好な特性を示すが、6dB 未満では提案方式の方が良好な特性を示している。M-ary SS 方式は、受信した符号に対して全種類の符号との相関処理を施し、相関が一番強い符号を検出して情報を復元する最尤系列推定を実施しており、特に低 CNR 環境下でその効果が発揮されたと考える。受信電力が小さい領域で良好な特性を示すということは、電力利用効率が良いことを意味するこ



(a) 熱雑音環境下



(b) 仲上-ライスフェージング環境下



(c) レイリーフェージング環境下

図 1 M-ary SS/OFDM 方式のスループット特性

とから、コンピュータシミュレーションにより提案方式の有効性が確認できた。

一方、OFDM方式の信号処理方法についても検討した。OFDM方式は高速フーリエ変換(FFT)を用いるのが一般的であるが、Wavelet変換を用いるOFDM方式が高速電力線通信(HD-PLC)に採用されている。FFT-OFDM方式と比較して、**Wavelet-OFDM方式の信号振幅の変動幅が小さく抑えられ、最も簡単なHarr Waveletを用いることで信号処理時間を5%程度短くできる**ことがコンピュータシミュレーションにより確認した。前者の利点に関しては、実証実験においてOFDM信号処理を端末に実装する際に効果を発揮する。

## (2) デジタル変調の多値化方法に関する検討

送受信機間が近距離の場合、電力利用効率よりも回線利用効率の向上を目的とした変調方式を採用するのが一般的である。本研究では、デジタル変調の多値化を効率良く実現する手法として、直交振幅変調(QAM)方式に信号点再配置法を適用したときの特性と、繰り返し符号化の際に情報ビットに応じた位相オフセットを付加する方法を適用したときの特性について検討した。本報告では、繰り返し符号化の利点を活かしつつ、スループット特性の向上効果が期待できる後者の方式について結果を報告する。

デジタル変調方式としてQPSKを採用したときのスループット特性を図2に示す。なお、同図中の凡例のporcは提案方式、rcは従来方式であり、Brは繰り返し回数を表している。位相オフセット量として $\pm\pi/2$ の2パターンを用意すると、デジタル変調シンボル1シンボルあたりに送信できるビット数を1ビット増やすことができ、同図中のRは追加の1ビットも含めた伝送レートを表している。同図より、従来の繰り返し符号化方法よりも、位相オフセットを活用した提案方式の方が良好なスループット特性を示している。**熱雑音環境下で最大約1dB、レイリーフェージング環境下で最大約0.8dBの電力改善効果が確認できた。**追加の1ビットの効果は、高いCNR環境下では回線利用効率の向上につなげることができる。一方、従来方式と同一の伝送レートと比較すると、提案方式の繰り返し回数を増加させることができるため、低いCNR環境下では電力利用効率の改善につなげることができる。つまり、**無線回線の環境に応じて、電力利用効率と回線利用効率のバランスを考慮した制御が可能になり、提案方式の有効性が確認できた。**

## (3) 無線ネットワークエリアの広域化および送受信機の低消費電力化に関する実証実験

(1)と(2)のコンピュータシミュレーションで明らかにした提案方式の有効性を実験的に検証するために、様々な環境を想定した**実証実験を実施**した。コンピュータシミュレーションでは、搬送波対雑音電力比CNRをパラメータとしたスループット特性を評価することで、提案方式の電力利用効率の向上効果が確認できた。**電力利用効率の向上効果は、送信電力を維持して同一の伝送品質を担保できる伝送距離を延ばす無線ネットワークエリアの広域化**につながることから、実証実験では、伝送距離対スループット特性を比較・検討した。**可視光伝送系、FM伝送系、音波・超音波伝送系**の3種類の無線伝送系を構築し、無線センサネットワークを視野に入れた送受信端末として、**廉価なマイコン開発ボードやシングルボードコンピュータ、Android端末**(スマートフォン)にOFDM信号処理を実装して実証実験を実施した。実験の様子を図3~5に示す。また、様々な実験環境における伝送距離対スループット特性を図6に示す。ただし、同図(d)は、(1)で述べたWavelet-OFDM方式を採用したときの特性である。いずれの無線伝送系においても、送受信回路の調整によって伝送距離は大きく変わるため、本報告では、従来方式と提案方式の相対的な比較・検討が重要である。本検討では、実際の無線伝送系の周波数特性の把握や送受信機間の同期処理などの改良の余地が残っていることから、

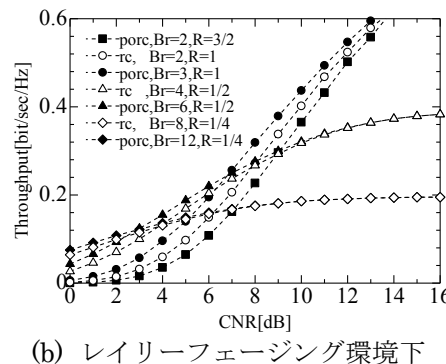
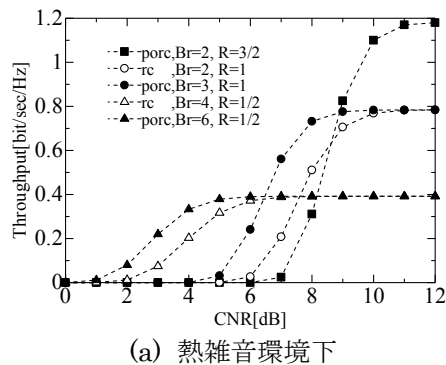


図2 位相オフセットを活用した繰り返し符号化OFDM方式のスループット特性

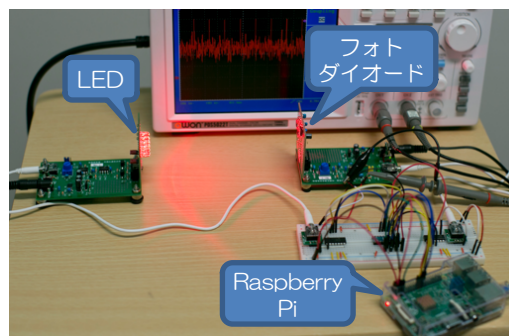
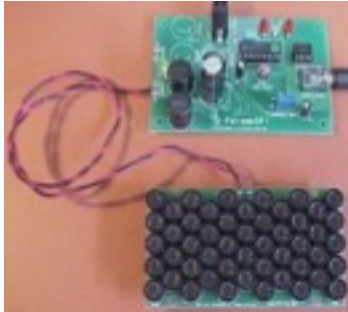


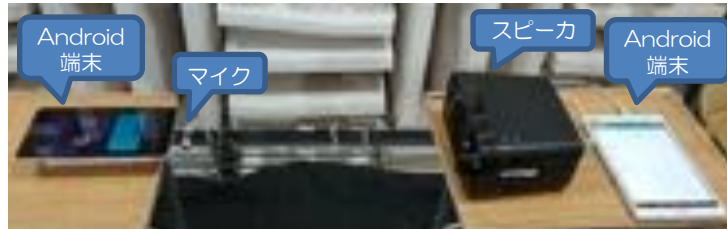
図3 可視光伝送実験の様子



図4 FMトランスミッターとFMラジオを活用したFM伝送実験の様子

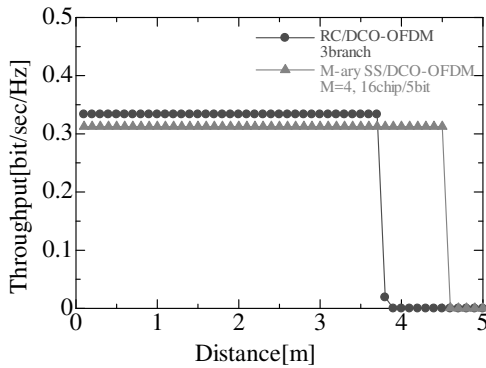


(a) 超音波伝送実験用  
パラメトリックスピーカ

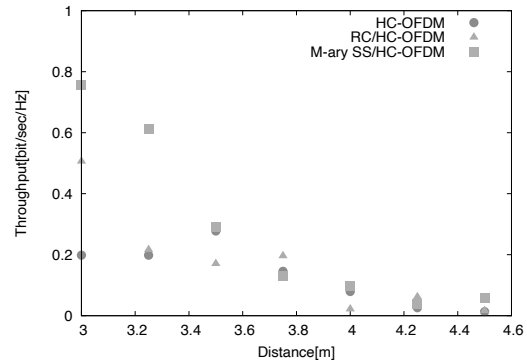


(b) スピーカとマイクを活用した音波伝送実験

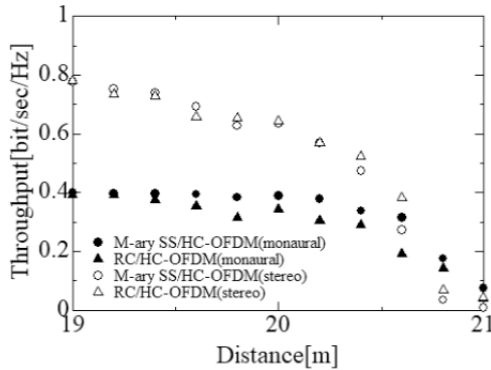
図5 音波・超音波伝送実験の様子



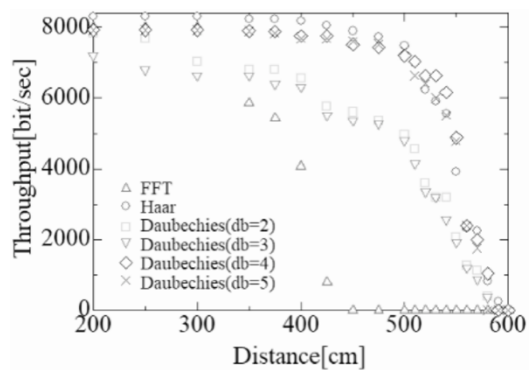
(a) 可視光伝送実験結果



(b) 超音波伝送実験結果



(c) FM伝送実験結果



(d) Wavelet-OFDM方式による可視光伝送実験結果

図6 様々な実験環境における伝送距離対スループット特性

FM 伝送系では従来方式と提案方式に顕著な差が見られなかったが、それ以外の無線伝送系では、提案方式の有効性が確認できた。また、図6(d)より、コンピュータシミュレーションで確認した提案方式の有効性、すなわち「信号振幅の変動幅が小さい」と「信号処理時間を短縮できる」の効果により、Wavelet-OFDM方式は伝送距離を大幅に延ばすことができ、最大スループット値も向上していることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Taiki Shimada, Sota Oguri, Fumihito Sasamori, Hiroyuki Sato, Hiroyuki Tsuchiya, Osamu Takyu, Shiro Handa
2. 発表標題 Performance Evaluation of Phase Offset RC-OFDM Systems
3. 学会等名 Annual Conference on Engineering and Applied Science (ACEAT) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Yomoda, Fumihito Sasamori, Osamu Takyu, Shiro Handa
2. 発表標題 Implementation and Performance Evaluation of Wavelet-OFDM Signal Processing on Single Board Computer
3. 学会等名 Annual Conference on Engineering and Applied Science (ACEAT) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋田 大樹, 小栗 颯太, 笹森 文仁, 佐藤 寛之, 土屋 博之, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 位相オフセットを活用したRC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 辻 宏治郎, 大崎 文裕, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 信号点再配置法を適用したLDPC符号化RC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小栗 颯太, 嶋田 大樹, 笹森 文仁, 佐藤 寛之, 土屋 博之, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 広帯域無線デバイスをを用いたM-ary SS/OFDMの実装及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大崎 文裕, 辻 宏治郎, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 信号点再配置法を適用したRC-OFDM信号処理のシングルボードコンピュータへの実装及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 四方田 佑介, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 Wavelet-OFDM信号処理のシングルボードコンピュータへの実装及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐渡 星也, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 多シンボル遅延検を適用したOFDM信号処理のシングルボードコンピュータへの実装及び特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 涼, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 音響通信を用いたOFDM信号処理のAndroid端末への設計・実装
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Michiwaki, Fumihito Sasamori, Osamu Takyu, Shiro Handa
2. 発表標題 Performance Evaluation of M-Ary SS/HC-OFDM System with Short Spread Codes in Ultrasound Transmission
3. 学会等名 2018 International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sunao Narita, Fumihito Sasamori, Osamu Takyu, Shiro Handa
2. 発表標題 Performance Evaluation of M-Ary SS/HC-OFDM System with Short Spread Codes in Stereo FM Transmission
3. 学会等名 2018 International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Ogawa, Fumihito Sasamori, Osamu Takyu, Shiro Handa
2. 発表標題 Performance Analysis of Bit Error Rate using Repetition Coded OFDM Systems in Nakagami-m Fading Environment
3. 学会等名 2018 International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 小川貴之, 笹森文仁, 田久修, 半田志郎
2. 発表標題 仲上-mフェージング環境下における繰り返し符号化OFDMシステムを用いたビット誤り率の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 辻宏治郎, 笹森文仁, 半田志郎, 田久修
2. 発表標題 信号点再配置法を適用した繰り返し符号化OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 道脇大輝, 笹森文仁, 田久修, 半田志郎
2. 発表標題 短い拡散符号を用いたM-ary SS/HC-OFDMシステムの超音波伝送時における特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐渡星也, 笹森文仁, 田久修, 半田志郎
2. 発表標題 多シンボル遅延検波を適用したOFDM信号処理のシングルボードコンピュータへの実装・特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 成田素直, 笹森文仁, 田久修, 半田志郎
2. 発表標題 ステレオFM伝送時における短い拡散符号を用いたM-ary SS/HC-OFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口涼, 笹森文仁, 田久修, 半田志郎
2. 発表標題 Android端末へのOFDM信号処理の設計・実装
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 四方田佑介, 笹森文仁, 田久修, 半田志郎
2. 発表標題 Wavelet-OFDM信号処理のシングルボードコンピュータへの設計・実装
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qirui Xia, Fumihito Sasamori, Shiro Handa, and Osamu Takyu
2. 発表標題 Performance evaluation of M-ary SS/OFDM systems with short spread spectrum codes over visible light channels
3. 学会等名 International Conference on ICT Convergence (ICTC) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉村 賢人, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 シングルボードコンピュータにおけるLDPC符号の特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小川 貴之, 笹森 文仁, 半田 志郎, 田久 修
2. 発表標題 仲上-mフェージングシミュレータを用いたビット誤り率特性の解析
3. 学会等名 電子情報通信学会信州大学Student Branch論文発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 成田 素直, 田久 修, 笹森 文仁, 半田 志郎
2. 発表標題 ステレオFM伝送時におけるOFDMシステムの特性評価
3. 学会等名 電子情報通信学会信州大学Student Branch論文発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮崎 和希, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 デジタルカラーセンサを用いた可視光OFDMシステムの一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会信州大学Student Branch論文発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 森 洋輝, 笹森 文仁, 田久 修, 半田 志郎
2. 発表標題 FFT-OFDMシステムとWavelet-OFDMシステムのクリッピングによるBER特性の比較
3. 学会等名 電子情報通信学会信州大学Student Branch論文発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考