

地中通信を行うセンサネットワーク構築のための受信機に関する研究

代表研究者 神谷 幸宏 愛知県立大学 情報科学部 准教授

1 はじめに

ひずみ計，地震計などのセンサを土中・コンクリート中に埋設し，ワイヤレス通信を介してデータを収集する地中センサネットワークが注目を集めている。これにより地震・地すべりといった自然災害の予知，監視が可能になる。このようなセンサネットワークを本稿では「地中センサネットワーク」と呼ぶことにし，そのイメージを図 1 に示す。地中センサネットワークでは，地表に設置されるセンサネットワークとは異なる技術的問題が生じる。その多くは，地中において信号の減衰が激しく，受信機において受信信号の信号対雑音電力比（SN 比）が著しく低下することに由来する。本研究では，センサからデータを収集する受信機にブラインド信号処理と称するデジタル信号処理を応用することで問題を解決することを目指す。このブラインド信号処理として，研究代表者が提案した BRAKE 法^[1]を用いる。

本稿ではまず，次節において必要な基本的事項をまとめるとともに，研究の背景を説明する。次に，地中センサネットワークで生じる問題を示したあと，その解決を行う信号処理を提案し，計算機シミュレーションによる性能検証結果を示す。

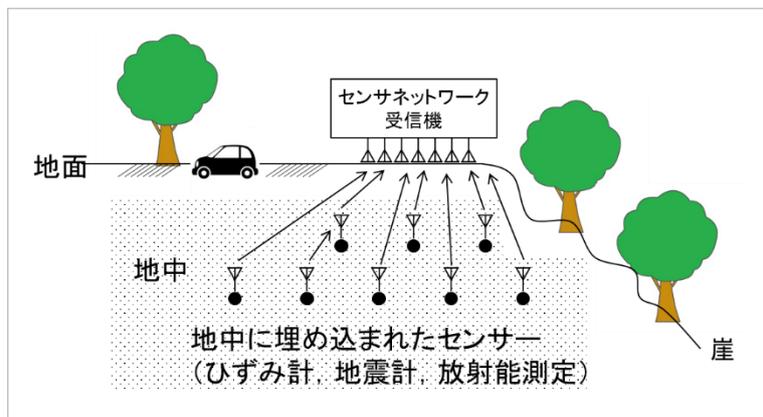


図 1 地中センサネットワークのイメージ

2 研究の背景と基本的事項

2-1 研究の背景

研究代表者は 2000 年ごろから，時空間ブラインド信号処理の研究に取り組んできた。その成果として BRAKE 法^[1]がある。また，その基本的な考え方を様々なシステムに応用し発展させてきた^{[2]-[8]}。

ブラインド(blind)信号処理とは，対象となる信号に関する予備知識がない状態で行う信号処理を言う。実際には，完全なブラインド信号処理，つまり対象信号について一切の知識がない状態で行う信号処理はない。しかし，ふつうの信号処理で想定される事前情報を使わない場合，その信号処理はブラインド信号処理と呼ばれる。

ブラインド信号処理の歴史は古く^{[9][10]}，その理論的な側面からの研究は非常に多い。しかしそれらのほとんどは現実のシステムへの応用が困難なものである。また，移動体通信システムなどのワイヤレス通信を考えた時は，あえてブラインド信号処理を用いる必要があまりなかった。受信機は信号に関して十分な事前情報を得ることができるからである。またブラインド信号処理は概して計算量が多いことも問題である。

BRAKE 法もその例外ではなく，実用面での有効性には乏しいと考えられていた。しかし近年，センサネットワークシステムが登場し，これがブラインド信号処理の応用先として有効なものであることに着目したのが本研究である。BRAKE 法がセンサネットワークに有効であるという点については，3

章において詳しく説明する。

2-2 BRAKE 法の特長

ここで BRAKE 法の概略と特長についてまとめる。まず、BRAKE 法はスペクトル拡散信号を対象とする。スペクトル拡散方式^[11]は雑音への耐性が高いと言われ、センサネットワークにおいても ZigBee などの規格で採用されている。その送信機・受信機の構成を図 2 に示す。この構成において特徴的な点として、まず、送信機・受信機で同一の拡散系列を用いることが挙げられる。送信機で用いられた拡散系列を知らない受信機は、信号を検出することができない。また、スペクトル拡散方式の利点として挙げられるものに、受信機において行われる RAKE 合成がある。これは、フェージング環境において生じる遅延波のエネルギーを合成することで受信 SN 比を高める信号処理である。しかしこれを行うにあたって、事前にチャネル状態の推定が必要となる。

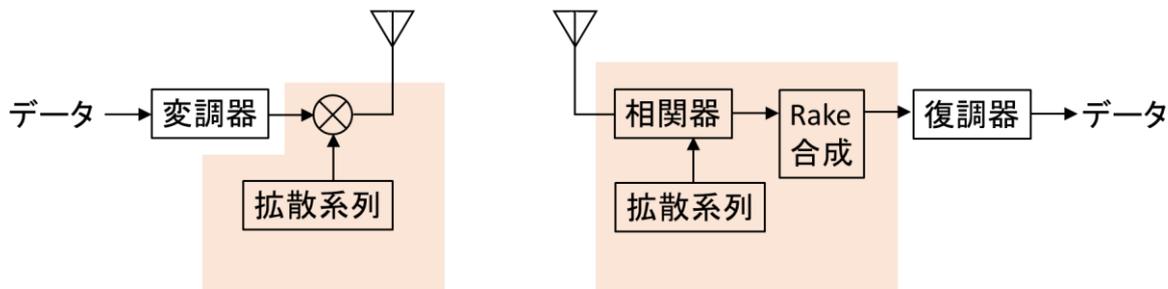


図 2 スペクトル拡散方式の送信機・受信機の構成

このようなスペクトル拡散方式を前提に、BRAKE 法はつぎのような特長を有する。

- 受信機は、拡散系列を知らなくても信号の検出が可能となる。
- また受信機は、チャネル状態の推定を行わないで RAKE 合成を実現できる。
- 信号のタイミングを知らなくてもよい。
- 複数のアンテナを用いた時、アンテナ受信信号の合成を参照信号なしで行える (3-2 節参照)。

これらの特長を活かして地中センサネットワークの問題を解決するのが本研究のアイデアである。

3 地中センサネットワークの課題とその解決方法

地中センサネットワークにおける課題と、その解決アプローチを以下に列挙する。これらの課題の全体像とその解決方法を図 3 に示したあと、それぞれについて詳しく説明する。

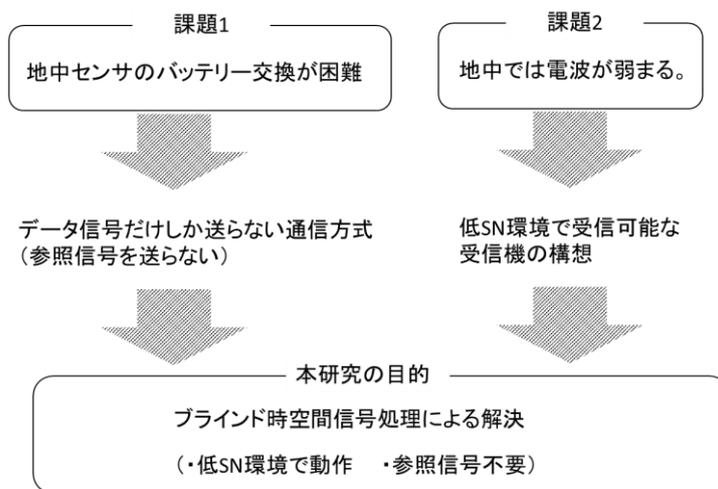


図 3 課題と解決方法の全体像

3-1 センサのバッテリー寿命延長

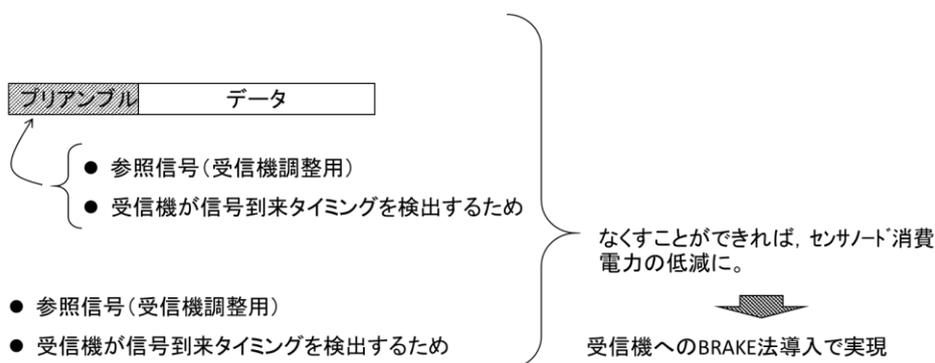
(1) 問題

地中センサネットワークを構成するセンサは土中深く、またはコンクリートに埋設されてしまう。このため、バッテリー交換が困難であり、使い捨てとなることが予想される。このため、バッテリー寿命の延長が特に重要なものとなる。

本研究では、センサが送信する信号を短くすることによってセンサの消費電力削減を実現する。バッテリー消費は特に信号の送信で著しいため、送信信号の削減は消費電力低減に効果があるものと見込まれる。具体的には、送信信号のうち、データの前に負荷されるプリアンブルを送信しないようにする。プリアンブルとは、送信機・受信機があらかじめその波形を既知として共有する信号であり、データの前に付加されて送信される。このイメージを図 4に示す。受信機が受信したプリアンブルは雑音などにより乱されているが、受信機は、あらかじめ知っている正しいプリアンブルの波形と、受信したプリアンブルの波形との差から通信路の状態を推定できる。また、信号のタイミングも検出できる。後述する低 SN 比となる環境では、プリアンブルが特に重要な役割を果たす。

プリアンブルはデータを表現するものではないため、伝送効率を下げることになる。また前述のように、その送信によって送信機のバッテリーを消費する。しかし、それがないと従来の受信機は信号の検出ができない。

“プリアンブル”とは



その役割

- 参照信号(受信機調整用)
- 受信機が信号到来タイミングを検出するため

図 4 プリアンブルのイメージ

(2) 解決アプローチ

本研究では、受信機にブラインド信号処理を用いることで、プリアンブルなしで信号を検出することを可能とする。ブラインド信号処理とは、多くのデジタル信号処理がプリアンブルのような既知信号を必要とするなかで、それを必要としない信号処理を言う。本研究では、研究代表者が提案した信号処理アルゴリズムである BRAKE 法^[1]をここに応用することで問題の解決を図る。

3-2 低 SN 比となる受信信号への対処

(1) 問題

地中センサネットワークにおいて、送信された信号は土中・コンクリート中を伝搬するため減衰が激しい。このため受信機において SN 比が大幅に劣化する。こうした状況に対応するため、受信機に複数のアンテナを設置して受信信号を適切に合成することで SN 比を改善することが考えられる。このイメージを図 5に示す。ただし、複数のアンテナで受信した信号をただ足し合わせただけでは信号の SN 比を改善できない^[12]。SN 比を改善するためには、適切な重み係数をかけたあとに足し合わせる必要がある。したがって問題は、この重み係数をどのように算出するかにか絞られる。

多くの重み係数計算アルゴリズムは、参照信号を用いる。参照信号は図 6に示すように、その波形を送信機と受信機の間であらかじめ共有している信号である。これを用いて受信機は、受信信号と参照信号との差の情報を元に重み係数を算出する。この参照信号としても、プリアンブルは用いられていたが、本研究では上述のようにバッテリー寿命の延長を目指してプリアンブルを使用しないので、参照信号なしで重み係数を算出するアルゴリズムが必要となる。

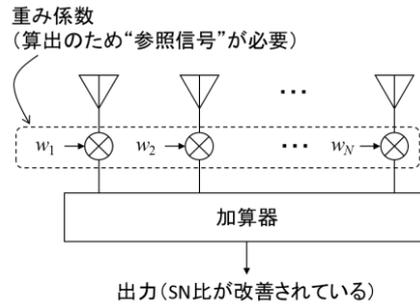


図 5 複数のアンテナを用いた受信 SN 比改善のイメージ

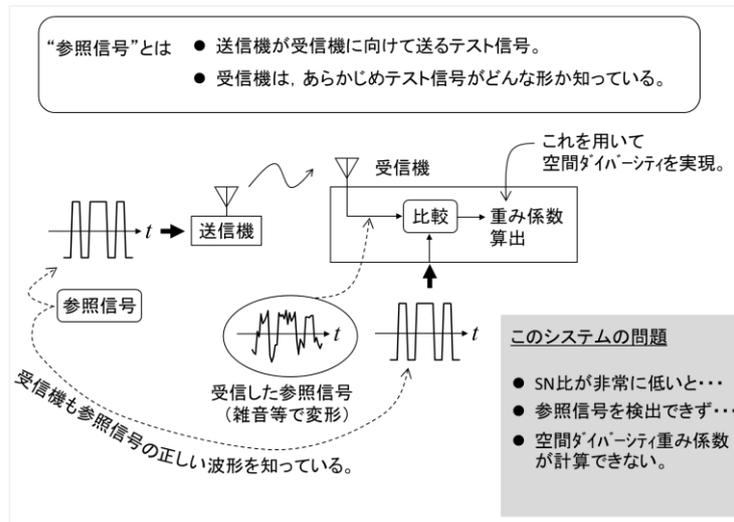


図 6 参照信号を用いた重み係数算出の仕組み

(2) 解決アプローチ

参照信号がない信号の検出を行うにあたり、受信機に BRAKE 法を採用する。BRAKE 法はスペクトル拡散信号を対象として 2-2 節に挙げた信号処理を行うことができる。すなわち、参照信号がなくても複数アンテナによる受信信号を SN 比が高くなるように合成するのに必要な重み係数を推定することができる。

3-3 センサネットワークにおいて特に問題となる点

上述の 3-1 節および 3-2 節で述べた問題の解決は、BRAKE 法を用いることで達成できることは明らかである。しかし、センサネットワークにおいて特に問題となるのが、データの短さである。BRAKE 法は内部にデジタルフィルタをもち、その重み係数を最急降下法によって推定する。このとき、信号が短いと最急降下法で十分精度の高い重み係数が推定できず、結果として SN 比改善効果が十分に得られない。

地中センサネットワークではひずみ量、震度など比較的短いデータを送ることになるため、データが短く、結果として BRAKE 法を用いても十分な結果が得られないことが予想される。そこで本研究では、簡単な方法でこの問題を解決し、計算機シミュレーションによりその効果を検証した。

4 提案手法

短いデータが信号として伝送されてくるとき、その信号は短くなる。それをサンプリングして得られるサンプルの数は少ない。すなわち問題は、少ないサンプルでいかに最急降下法による重み係数の推定精度を上げるか、ということである。

提案手法の基本アイデアを図 7に示す。まずステージ 1 において、信号のサンプルを BRAKE 法に入力してデジタルフィルタ重み係数を得る。しかし前述のように、短いサンプルでは最急降下法による推定が十分に収束しないので、得られた重み係数の精度は低い。このとき、最急降下法で推定する重み係数の初期値は、最適重み係数に関する知識が何もないことから、例えば、係数を一つだけ 1 にし、他はすべて 0 にする、というように決めるしかない。

こうして得られた、精度の低いステージ 1 の重み係数を初期値として使い、再度、最急降下法による重み係数推定を行う。この際に用いる信号サンプルは、メモリに記録されていたサンプルであって、第 1 ステージで用いたのと同じものである。この 2 回目の重み係数推定をステージ 2 と呼ぶ。この結果推定された重み係数の精度は、ステージ 1 における結果よりも高いものとなる。

ステージ 2 で得られた重み係数を初期値としてさらに、最急降下法による重み係数推定を続ける。これをステージ 3 とする。このときも、BRAKE 法に入力されるのは、メモリに記録されていた、ステージ 1 と同一のサンプルである。

このようにステージを重ねることで、同じ短いサンプルを使っていながら、重み係数の推定精度は徐々に、どんどん高まっていく。この性能改善効果を計算機シミュレーションにより確認した。

Stage #1

Signal samples \Rightarrow BRAKE \Rightarrow Estimated weight coefficient (Not precise)

Stage #2

Signal samples \Rightarrow BRAKE \Rightarrow Estimated weight coefficient (better)

Stage #3

Signal samples \Rightarrow BRAKE \Rightarrow Estimated weight coefficient (better)

図 7 提案手法のイメージ

5 計算機シミュレーションによる性能の検証

提案手法により、少ないサンプルで受信 SN 比を BRAKE 法により改善する効果を検証する。表 1 にシミュレーション条件を示す。このシミュレーションでは、地中センサネットワークにおいてきわめて受信 SN 比が低い場合を想定し、アンテナ 1 本あたりの SN 比が $-3B$ となっている場合を想定する。このような設定では通常、信号の検出はできない。BRAKE 法ではこのような条件においても、拡散系列の情報なしで、かつ、信号のタイミングがわからないまま、信号の検出を行うことができる。

ただし、本シミュレーションでは、このきわめて低い SN 比に対処するため、受信機に 50 本のアンテナを設定することを想定している。この数は多いが、地中センサネットワークにおいて受信機は地表に設置されるとともに電源が供給されるので、比較的多数のアンテナ設置が可能であるものと考えられる。

また、地中センサネットワークではデータが少量であり、伝送速度は低いものとなって差し支えないものと考えられる。このため、BRAKE 法自体は周波数選択性フェージングへの対策として RAKE 合成をブラインドで行うことができるものの、本シミュレーションにおいてはフェージングの影響は考慮していない。

なお、本シミュレーションでは図 7 に示したステージを 100 まで用意し、なんども繰り返して重み係数の精度を高めていく。

表 1 シミュレーション条件

The number of antenna	50
Antenna spacing	Half-wavelength spacing linear array
Spreading code	15-chip M-sequence (Spreading gain 11dB)
Input SNR [dB/antenna/symbol]	-3dB
Modulation	BPSK
Channel	No fading
Angle of arrival	30 [degree]
The number of input samples	100 - 4300
The number of stages	100

表 1のシミュレーション条件では、アンテナ利得が 17dB となるので、アンテナ受信信号を正しく合成できれば、アンテナ 1 本あたりの受信 SN 比である -3dB から 17dB 上昇し 14dB まで改善できることになる。このシミュレーションを、受信サンプル数を変化させて行い、BRAKE 法出力の SN 比を図 8に示す。提案手法に対して従来手法は、図 7に示したような複数回のステージを行わない方法である。つまり、ステージ数が 1 となっている。一方、提案手法では 100 ステージまで、図 7に示した手順を繰り返している。

理論的な最大 SN 比である 14dB から 2dB 低い 12dB への到達に必要な入力サンプル数で提案手法 (Proposed) と従来の BRAKE (Conventional) を図 8で比較してみる。すると、約 1500 サンプル必要であった従来に対し、提案手法は必要サンプル数を 3分の1程度まで削減し、480 サンプルで 12dB に到達している。

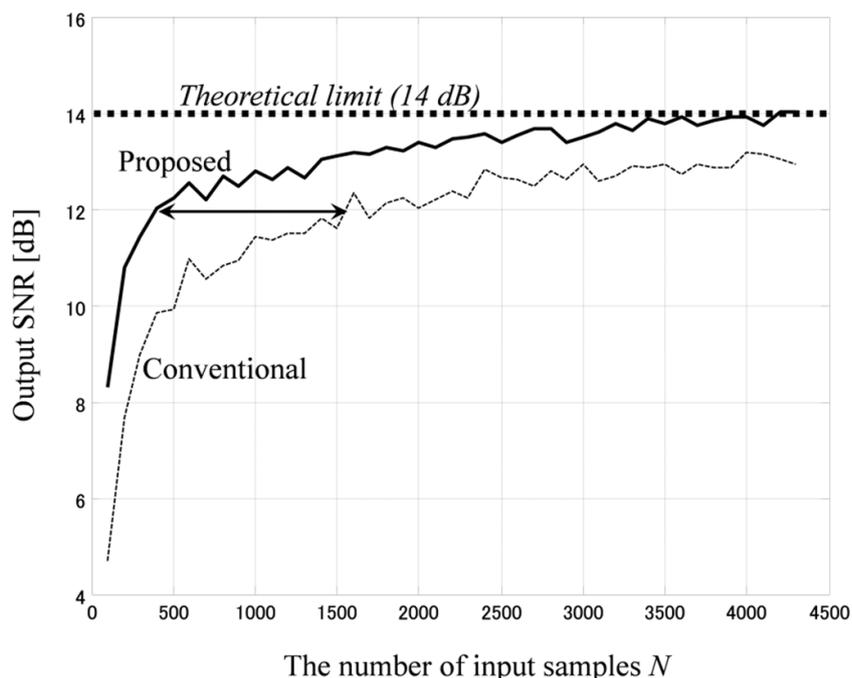


図 8 シミュレーション結果

ここで 480 サンプルというサンプル数について検討してみる。本シミュレーションではスペクトル

拡散信号を仮定し、1チップあたり4サンプルのサンプリングを行っている。また、拡散系列長は15チップである。このことから、480サンプルは、 $480/4/15=8$ シンボル分に相当する。本シミュレーションでは変調方式としてBPSKを想定しているため、これは1バイトの情報に過ぎず、きわめて短いデータに相当することがわかる。

以上のシミュレーションによって、図7に示した簡単な方法でBRAKE法をセンサネットワークの短い信号に対応させ、ブラインド信号処理によって受信SN比を高めることが可能であることを明らかにした。このことは、受信SN比がきわめて低く、かつ、受信信号が短くなる地中センサネットワーク用受信機において重要な役割を果たすものと考えられる。

6 おわりに

本研究では、地中センサネットワークにおいてセンサからの信号を受信する受信機にブラインド信号処理を適用する際必要となる新しい方式を提案した。地中センサネットワーク受信機において問題になるのが、きわめて低い受信信号のSN比である。これは、土中・コンクリート中において電波の減衰が激しいことが原因である。

これに加えて、地中センサネットワークのセンサノードのバッテリー寿命を伸ばすため、センサノードのプリアンプルをなくすことを提案した。センサネットワークでは、温度やひずみ量などをデータとするため、その量は比較的小さい。このため、プリアンプルばかりが長くなってしまいう傾向にある。これを削減することは、送信に必要な電力を大幅に削減できることから、バッテリー寿命延長に大きな効果があると期待される。

そうした低いSN比となる環境で信号を受信するために、受信機は複数のアンテナを備える必要があるが、それら複数アンテナの受信信号を合成するにあたって必要となる重み係数の算出にはプリアンプルが必要であった。プリアンプルなしで行うためにブラインド信号処理としてBRAKE法が有効である。

しかしBRAKE法は、内部のデジタルフィルタの重み係数推定のために長い受信信号のサンプルが必要である。センサネットワークではそのような長いサンプルを得ることが難しいことが課題であった。本研究では簡単なアルゴリズムによりこの問題を解決し、計算機シミュレーションによりその効果を明らかにした。

これにより、地中センサネットワーク実現のための新しい受信機の構成が明らかとなったのみならず、これまでなかなか実用に供されなかったブラインド信号処理の新しい応用方法として画期的である。

【参考文献】

- [1] Y. Kamiya, K. Ochiai and Y. Karasawa, "A Multistage Blind Adaptive Array Antenna for Multiuser Signal Detection in Asynchronous SS Sysmtes", IEICE Transactions on Communications, Vol. E86-B, No. 8, pp. 2414-2424, August 2003.
- [2] Y. Kamiya and O. Besson, "Interference Rejection for Frequency-Hopping Communication Systems Using a Constant Power Algorithm", IEEE Transactions on communications, Vol. 51, No. 4, pp. 627-633, April 2003.
- [3] K. Takayama, Y. Kamiya, T. Fujii and Y. Suzuki, "A New Blind 2D-RAKE Receiver based on CMA criteria for Spread Spectrum Systems Suitable for Software Defined Radio Architecture," IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B, No. 6, pp. 1906-1913, June 2008.
- [4] M. Kozuma, Y. Kamiya, T. Fujii, K. Umabayashi and Y. Suzuki, "A New Blind Adaptive Array Antenna based on CMA criteria for M-ary/SS Signals Suitable for Software Defined Radio Architecture," IEICE Transactions on Fundamentals, Vol. E91-A, No.8, pp.1982-1989, August 2008.
- [5] T. Sakaguchi, Y. Kamiya, T. Fujii and Y. Suzuki, "Forward Interference Avoidance in Ad Hoc Communications using Adaptive Array Antennas," IEICE Trans. on Communications, Vol.E91-B, No.9, pp.2940-2947, September 2008.

- [6] 坂口智文, 神谷幸宏, 梅林健太, 鈴木康夫, ”アドホックネットワークにおける AAA を用いた高効率空間利用メディアアクセス制御方式,” 電子情報通信学会論文誌(B), Vol.J92-B,No.1, pp. 79-87, 2009 年 1 月.
- [7] 小林圭太, 神谷幸宏, 梅林健太, 鈴木康夫, ”FIA に基づくアダプティブアレーアンテナを用いた OFDM 無線アドホック通信の周波数利用効率改善,” 電子情報通信学会論文誌(B), 研究速報, Vol.J92-B No.3, pp.595-598, 2009 年 3 月.
- [8] A. M. Nazari, Y. Kamiya, K. Shojima, K. Umebayashi and Y. Suzuki, “A New Blind Beamforming and Hop-Timing Detection for FH Communications,” IEICE Trans. on Communications, Vol. E94-B No.5, pp.1234-1242 , May 2011.
- [9] X. Shi, “Blind Signal Processing: Theory and Practice,” Springer, 2012.
- [10] V. Zarzoso, “Blind and Semi-Blind Signal Processing,” Lambert Academic Publishing, 2010.
- [11] 丸林 元, 河野 隆二, “スペクトル拡散通信とその応用”, コロナ社, 1998 年.
- [12] 神谷幸宏, “MATLAB によるデジタル無線通信技術”, コロナ社, 2008 年.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A New Method to Apply BRAKE to Sensor Networks Aiming At Power Saving	Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services (IIMSS 2016)	2016 年 6 月
A New Approach for Subsurface Wireless Sensor Networks	Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services (IIMSS 2016)	2016 年 6 月