

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560366

研究課題名（和文） 適応マルチバンドパルス型UWBによる高信頼微弱無線伝送技術の研究

研究課題名（英文） Study on Reliable Low-power Wireless Communication Systems
Using Multiband Pulsed UWB Technology

研究代表者

佐々木 重信（SASAKI SHIGENOBU）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20242399

研究成果の概要（和文）：

適応マルチバンドパルス型ウルトラワイドバンド(UWB)方式による高い信頼性を持つ小電力無線データ伝送の実現を目標とした。基本となる直接拡散パルス型UWBによる一定レベルの受信性能を得る確率」である誤り率の累積分布による評価を、UWBマルチパス通信路モデルを前提に行った。またUWBによる時間一周波数ダイバーシチ送受信の一環として、UWBにおける協力中継の効果を計算機シミュレーションにより明らかにした。非見通し環境における単純なダイバーシチ受信と比べ受信性能を改善できる可能性を示した。

またUWBパケット伝送の成功確率の向上のカギとなる同期捕捉について、RAKE受信による時間ダイバーシチによるマルチパス対策と、同期点の誤検出を減らすための確認モードを導入し、計算機シミュレーションによる性能評価を行い、同期捕捉性能の向上が見込めることを示した。また最大値検出及び区間推定を用いる同期捕捉法を提案し、シミュレーションによる性能評価の結果、提案法が同期のタイミングをマルチパス環境下でもより正確な同期捕捉を行うことと同期捕捉時間の短縮効果を確認した。

研究成果の概要（英文）：

The goal of this project is developing reliable low-power wireless communications by using multiband pulsed ultra wide band (UWB) technology. In this project, the following topics are investigated.

First, the performance of direct sequence ultra wide band (DS/UWB) systems is evaluated under the multipath fading environment from the viewpoint of ensuring a certain level of error rate performance by using cumulative distribution function (CDF) of bit error rate.

Second, performance of cooperative communications for DS/UWB in multipath channel is investigated. According to the computer simulation results, it is found that use of cooperative communications is effective to improve the performance in non line-of-sight multipath channel comparing with the use of conventional diversity reception in DS/UWB.

Third topic is the acquisition performance DS/UWB communication systems, especially in packet communications. In wireless packet transmission, the acquisition must be completed in the preamble duration in the packet. In this project, RAKE combining and verification mode is employed in DS/UWB packet transmission to combat multipath fading. According to the simulation results under the IEEE802.15.4a multipath fading environment, significant improvement of acquisition probability is achieved by using RAKE combining. Also, mean acquisition time becomes shorter when the verification mode is equipped with the DS/UWB acquisition system. Also, using peak detector and interval estimation is proposed to achieve faster and more accurate acquisition in multipath fading environment. Computer simulation results show that the peak detection and interval estimation is effective to capture the accurate peak of the matched filter output in the DS/UWB acquisition. In addition, the

reduction of the acquisition time is achievable by optimal design of the capturing interval for the peak detection.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成23年度	600,000	180,000	780,000
平成24年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード： UWB, 信頼性, パケット伝送, 同期

1. 研究開始当初の背景

高い信頼性を持つ小電力無線データ通信は、無線による産業機器やロボットの制御、医療・ヘルスケア応用における利用者の身体状況データの測定など、多くの応用が期待される。これらの応用ではサイズや消費電力の面から、機器全体の中で無線通信に割ける割合は少ない。そのためコンパクトかつ極力小さい消費電力で通信機能を果たすことが求められ、従来は微弱無線や特定小電力無線が用いられてきた。例えば小電力無線では2.4GHz帯などの特定の周波数を利用するが、図1に示すように電波の反射により生じるマルチパスによる干渉や、近接する周波数帯を用いる他の無線機器などからの干渉により信頼性が大きく損なわれることがあり、高信頼な通信を安定して実現することは困難であった。

ウルトラワイドバンド (UWB) 技術は、数百 MHz 以上の帯域幅の信号を用いる微弱無線技術であり、従来の特小電力無線に比べ消費電力を約 10 分の 1 程度にすることが可能と期待されている。UWB では放射電力密度が制限されているが、広い帯域を利用して柔軟な信号設計が可能であり、申請者はこれまでに異なる中心周波数のパルスを用いたマルチバンドパルス型 UWB の研究を進めてきた。この成果を基として、周囲の電波環境に応じ、周波数帯と電力を適応的に配分した UWB 信号を構成し、データの伝送に利用することで、微弱な電力でもマルチパスや他からの干渉に強く、高い信頼性を安定して維持する無線データ伝送の実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、UWB 技術を用いた高信頼な微弱無線データ伝送の可能性を明らかにすることである。その具体的アプローチとして本研究では、様々な周波数における電波環境を観測し、その情報をもとに送信信号の周波数帯や電力を調節して伝送する「適応マルチバンドパルス型 UWB 無線技術」を提唱する。それと共に、受信側で送信信号の性質を利用した時間一周波数ダイバーシチ受信技術を開発し、通信環境の変化に対応した信頼性の確保をねらう。ここでは従来からの平均的な受信性能の評価と共に、「一定レベルの受信性能を維持できる確率」の評価を導入し、他からの干渉の混入に対しても最低限の信頼性を確保できる受信技術の設計指針を確立する。

一方、現代の無線データ伝送の主流であるパケット伝送ではデータの前にプリアンブルが置かれており、この正確な復元が伝送の信頼性を確保するカギとなる。本研究では上記とあわせて適応マルチバンドパルス型 UWB 無線伝送の信頼性を向上させるプリアンブルの設計法を検討する。またプリアンブルの検出性能の評価を行い、提案する UWB 無線技術によるパケット伝送を考慮した高信頼な無線データ伝送の可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、

- (1) 周囲の電波環境の検出法
- (2) 環境に応じた適応マルチバンドパルス型 UWB 信号の設計法
- (3) 高信頼伝送のための時間一周波数ダイバーシチ受信技術、を最初の2年間で主に検討する。

(4) パケット伝送を前提にマルチバンド UWB 信号の特徴を考慮したプリアンプルの設計法と検出法の検討について検討を行った。本計画の各項目における性能評価では、平均的な信頼性と共に、一定の信頼性を確保できる確率の評価も重視し、主に計算機シミュレーションを用いて進める。

4. 研究成果

前節で述べた項目について検討を進めた中で、主立った成果を以下に列挙する。

(1) UWB 協力中継伝送の検討

産業機器等の制御に無線が用いられない主な原因として、劣悪な通信環境における信頼性の問題があげられる。ここでは、高信頼の無線通信をめざし、協力中継伝送による無線伝送の効果を評価した。

図 1 のように送受信機間に見通しがないモデルにおいて、双方から見通しのある中継機を用いたダイバーシチ伝送の効果を評価した。通信方式は IEEE802.15.4a 標準に基づく UWB (Ultra Wide Band) 伝送方式を用いた。通信路モデルとしては IEEE802.15.4a CM7, CM8 (産業環境の見通し, 非見通しチャンネルモデル)を用いた。

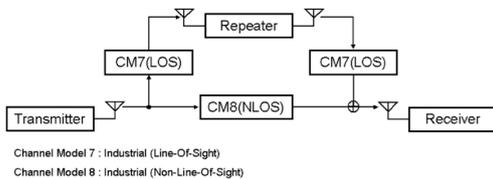


図 1 協力中継伝送モデル

中継法としては、中継機に入った信号を増幅だけして中継する AF 法 (増幅転送: Amplify and Forward) と、信号を一度復調し (復号はしないで) 再度変調してから中継する DF 法 (復調転送: Detected and Forward) の 2 つを想定し、表 1 のような諸元でシミュレーションを行った。中継機では送信機から送信された時と同じ振幅レベルまで信号を増幅するものとした。

表 1 シミュレーション諸元

無線伝送方式	UWB (IEEE802.15.4a)
パルス幅	2nsec
帯域幅	500MHz
中心周波数	4.4928GHz
伝送速度	0.85Mb/s
通信路モデル	AWGN 通信路
マルチパス通信路モデル	IEEE802.15.4a (CM7, CM8)
受信方式	RAKE 受信(32 パス)

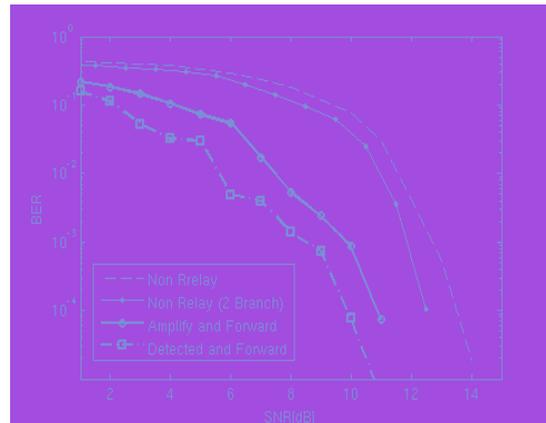


図 2 シミュレーション結果例

結果の一例を図 2 に示す。中継法を用いれば BER 特性を十分に改善できることがわかる。AF 法に比べて DF 法の方が改善の幅が大きい。また中継を行わずに受信機で 2 ブランチの最大比合成ダイバーシチ受信の BER 特性もあわせて示す。協力中継を行うことにより、通常のダイバーシチ受信よりも誤り率の改善が見込めることがわかる。これより、送受信機間が非見通しである時の送受信機双方から見通しのある中継機による中継の有効性が確認できた。

(2) UWB 高信頼伝送の性能評価

無線システムがあまり用いられていない分野のひとつに、制御応用がある。ここに無線通信を導入することによって、様々なメリットが期待できる。このような用途では少量のデータの確実な伝送が求められるが、ここでは、信頼性保証の観点からみた場合の、適切な無線システムの性能評価法を検討した。無線伝送方式には DS-UWB (Direct Sequence Ultra WideBand) 方式を用いた。

本検討では一般的な品質評価の尺度として知られる平均ビット誤り率だけでなく、誤り率の累積分布に基づく一定の通信品質の達成率、不達成率に注目し、性能評価を行った。

表 2 シミュレーション諸元

変調方式	BPM-BPSK/DS-UWB
パルス波形	Root Raised Cosine($\alpha=0.6$)
パルス幅	2ns
中心周波数	4.4928GHz
帯域幅	500MHz
伝送レート	0.85Mbps
通信路モデル	IEEE802.15.4a CM7+AWGN
誤り訂正符号	RS 符号 RS ₆ (63,55) 畳み込み符号 [2,5] ₈ (k=3,R=1/2)
Rake 受信	Selective Rake 最大比合成
分離パス数	32
合成パス数	3, 6, 12

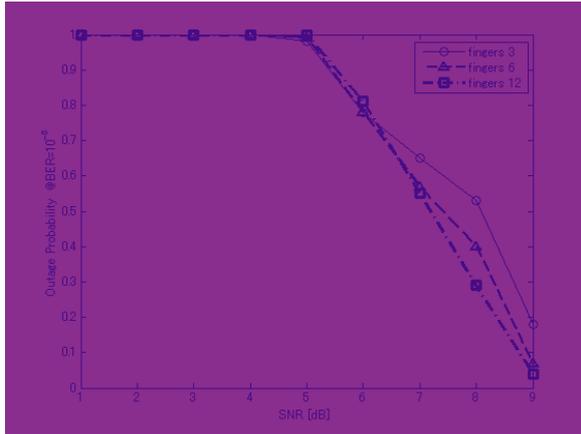


図3 BER=10⁻⁵におけるアウトエージ率

表2の諸元に基づき、誤り率の累積分布に基づく BER=10⁻⁵のアウトエージ（所望性能不達成）率を評価した結果を図3に示す。Rake受信の合成パス数により、SN比が高くなった際のアウテージ率に変化がみられる。SNR=9[dB]のとき、合成パス数12でBER=10⁻⁵を達成できない確率は4%であることがわかった。現在、より低いアウトエージ率を達成するための送受信方法の検討を進めている。

(3) UWB パケット伝送における同期捕捉法

短いパルスを用いるUWB信号はその低デューティー比という特徴から正確な同期捕捉が要求される。マルチパスフェージングにより遅延、減衰したパスに対して同期捕捉、同期追跡がなされた場合には送信電力のロス、多元接続干渉の増大につながる。復調部においてRAKE合成を利用する場合、マルチパスが到着し始めるタイミングを捕捉できなければRAKE受信によって合成可能なエネルギーの多くを見逃してしまう可能性が生じる。

ここでは短いパルスを用いる直接拡散型UWB(DS/UWB)パケット伝送における同期捕捉法について検討した。DS/UWBを用いたIEEE802.15.4a標準に基づくフレーム構成を想定し、そのプリアンブル信号について、マルチパスフェージング環境においてRAKE合成および確認モードによる同期捕捉特性について検討した。

IEEE802.15.4a標準のパケットはプリアンブル部とデータ部で構成されている。プリアンブル部は同期捕捉を行うSYNC部とデータ部の先頭を通知するためのSFD部からなる。本稿で着目するSYNC部では同一シンボルの連続で、使用するチャンネルにより決まった拡散符号が用いられる。SYNC部は1024シンボルを基本とし、オプションとして16, 64, 4096シンボルが規定されている。シンボルはパルス幅ごとのチップによって分割でき、拡散符号の要素毎に0値のチップがL-1個挿入される。拡散符号は[-1, 0, 1]の3値からなる

Ternary符号である。

同期捕捉操作は探索モードと確認モードに分けられる。探索部では受信信号に対し基準搬送波による直交検波を行い、LPFにより高周波成分を除去する。その後サンプリングを行い、送信側で用いられたTernary符号をアップサンプリングして得られる整合フィルタに入力する。整合フィルタ出力の同相、直交成分の二乗和により受信信号とTernary符号との相関値を得る。

同期捕捉前はチャンネル情報を利用した合成法を用いることができない。そこで相関出力においてもチャンネル応答の特徴が反映されることを利用し、相関出力をRAKE合成器に入力し得られた出力があらかじめ定められた閾値を超えた場合確認モードへと移行する。

確認モードでは探索モードにおいて検出されたタイミングにおいて、シンボル時間ごとにRAKE合成出力の判定を行う。指定した確認回数K回連続で閾値を超えた場合、同期と判定し同期捕捉を終了する。

前述システムでの同期捕捉操作について、SNR, RAKE合成数N_L, 確認モードにおける確認回数K, マルチパスフェージングのチャンネル応答を変化させてシミュレーションを行った。用いたIEEE802.15.4aプリアンブル信号の諸元を表3に示す。マルチパスフェージングはIEEE802.15.4a CM3(オフィス内見通し環境)を想定する。また、チャンネル応答を100種用意し、一つにつき100パケットの同期捕捉操作を行う。同期捕捉操作中のチャンネル応答は変化しないものと仮定した。サンプリング時間はパルス幅の半値の1nsとし、判定に用いる閾値は探索部における誤警報確率が1%となるよう設定した。RAKE合成の間隔はパルス幅と等しい2nsとした。同期と判定した捕捉タイミングが最も早く到着する第一パスからpeak PRFの周期の1/2以上異なっていた場合をシステム全体における誤警報の条件とした。

する。

表3 IEEE802.15.4a プリアンブル信号の諸元

中心周波数	4.49GHz (Mandatory in low band)
帯域幅	499.2MHz
パルス波形	ルートレイズドコサインパルス パルス幅 2ns ロールオフファクタ0.6
拡散符号長	31
L	16
PRF	16.1MHz(mean),31.2MHz(peak)

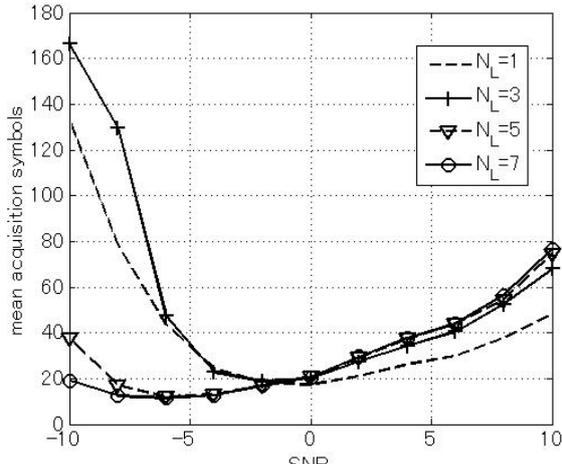


図4 平均同期捕捉時間 ($K=1, T_{fa} = 100T_{sym}$)

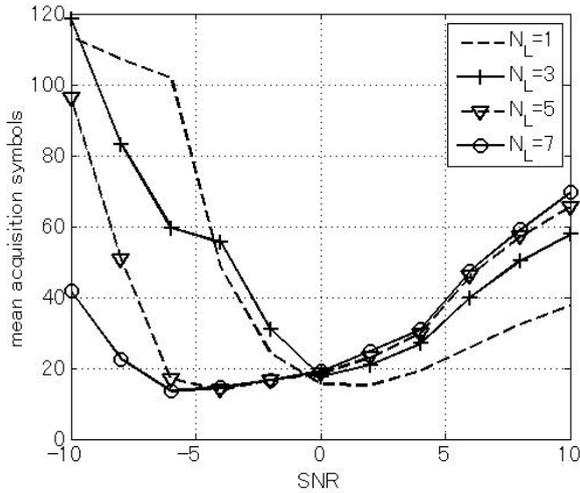


図5 平均同期捕捉時間 ($K=3, T_{fa} = 100T_{sym}$)

SNR に対する同期捕捉時間の平均を図4, 5に示す. 低 SNR において誤警報は長い第1パスピーク間隔による要因が大きく, 確認回数 $K=1$ では RAKE 合成数 $N_L = 5$ 以上でピークを誤警報の条件外へ引き込むことで誤警報の発生を低減する効果が得られる. 図5の確認回数 $K=3$ の場合には確認モード自体による同期捕捉時間の増加により $K=1$ の場合より平均同期時間は増加する. 高い SNR において増加する誤警報については RAKE 合成と確認モードでは改善の効果は見られないことが分かった.

SNR に対して SYNC 部を 1024 シンボルとした場合, この区間に同期を確立できずにパケットを廃棄する確率をパケット損失率として図6に示す. 高い SNR における平均同期時間, パケット損失率の増加は図6におけるチャネル応答 B のような特徴が顕著になるためと考えられる. 図7に SYNC 部を 64 シンボルとした場合のパケット損失率を示す. ペ

ナルティ時間が SYNC 部より長い状況であり, 誤警報が 1 回でも発生するとパケットの損失となる. 雑音のみでの探索部誤警報確率を 1% としているのでマルチパスフェージングによる誤警報を確認モードで低減する効果があることが分かる.

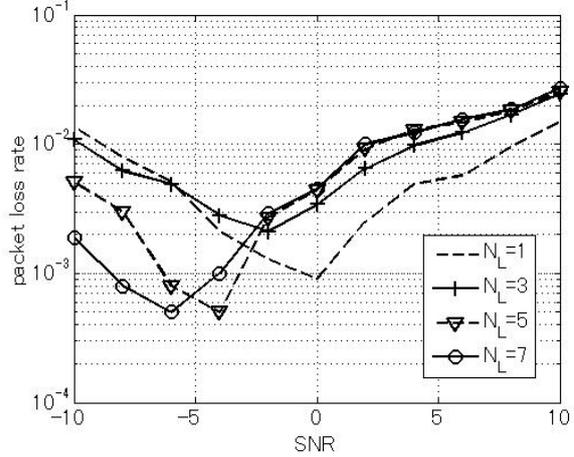


図6 パケット損失率

($T_{acq} \leq 1024T_{sym}, K=1, T_{fa} = 100T_{sym}$)

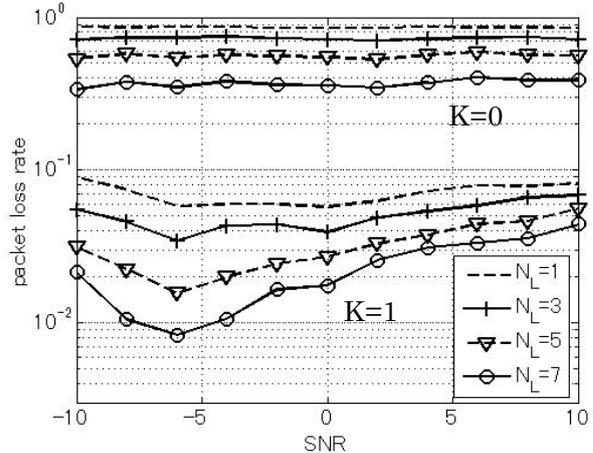


図7 パケット損失率

($T_{acq} \leq 64T_{sym}, T_{fa} = 100T_{sym}$)

この同期捕捉性能の改善を図るため, ピークのタイミングの検出と区間推定を導入した最大値検出アルゴリズムに基づく同期捕捉法を検討した. 区間推定を用いた最大値検出のプロセスの例を以下に示す.

1. T_{sam} 間隔で得られる相関値 Z より区間 N_{sec} ごとの判定量 D を取得する.
2. 最大値検出の対象となる区間の判定量 D_i , 決められた前後の区間の判定量 D_{i-1}, D_{i+1} ... が得られるまでプロセス 1 を繰り返す.
3. D_i と D_{i-1}, D_{i+1} ... の比較判定を行う.
4. 判定結果において D_i が選択されない場合,

最大値検出の対象区間を移動しプロセス1~3を繰り返す。

5. D_i の区間から最大値検出を行いピークのタイミングを得る。

プロセス4によって得られたタイミングの相関出力を同期捕捉操作における閾値との比較に用いる。

本提案システムでの同期捕捉性能についてマルチパスフェージングのチャネル応答を変化させてシミュレーションを行った。プリアンプの諸元は表3と同様とし、通信路モデルはIEEE802.15.4a CM3(オフィス内見通し環境)およびCM4(オフィス内非見通し環境)を想定した。

表4にシミュレーションにおける同期捕捉時間の計算結果を示す。同期捕捉時間の増加の要因は、誤警報の発生によるペナルティ時間 T_{fa} によるものが大きい。全ての条件で誤警報確率 P_{fa} は0.1%であり閾値は同一である。最大値検出を用いない場合、自己相関出力が存在しない状態で、雑音による成分が閾値を越えると誤警報が発生する。最大値検出を用いることで、区間内かつ雑音のピークよりも高い自己相関出力が存在すると誤警報は発生しない。また、区間推定を用いた場合、区間内に自己相関出力が存在していなくても区間推定のプロセス中の判定条件 $(D_i > D_{i-1}) \cap (D_i > D_{i+1})$ により、雑音によるピークは閾値による判定の対象とならない。したがって、誤警報の発生を抑制することによる平均同期捕捉時間の短縮が得られる。

表4 平均同期捕捉時間 (symbol)

		SNR (dB)		
		-6	0	10
CM3	最大値検出なし	7.365	6.747	9.245
	最大値検出 $N_{sec}=16$ 3区間	/	0.528	/
	最大値検出 $N_{sec}=992$	1.275	1.121	1.031
CM4	最大値検出なし	6.940	7.548	13.02
	最大値検出 $N_{sec}=16$ 3区間	/	0.573	/
	最大値検出 $N_{sec}=992$	1.301	1.137	1.054

同期捕捉時間の短縮については、誤警報を発生させず、同期となる状態を一度も見逃さずに捕捉することが最短である。同期捕捉において相関値 Z に対する閾値判定による検出は、誤警報の発生と低SNRの同期捕捉とのト

レードオフとなる。誤警報の抑制のために閾値を大きくすると低SNRの相関値は閾値を上回らなくなり、低SNR検出のために閾値を小さくすると誤警報が発生し同期捕捉時間は増加する。マルチパス環境を利用し区間設計と区間処理を適切に行うことで、さらなる低SNRでの高速な同期捕捉が期待できる。

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)

[学会発表] (計5件)

- [1] 猪子卓也、佐々木重信: DS/UWB 無線パケット伝送における同期捕捉に関する一検討、電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会、東京理科大学、平成22年7月23日
- [2] 本望冬樹、佐々木重信: 高信頼無線通信のための UWB 協力中継伝送の検討、電子情報通信学会信越支部大会、長岡技術科学大学、平成22年10月2日
- [3] 松本聡紀、佐々木重信: DS-UWB を用いた高信頼無線データ伝送に関する一検討、電子情報通信学会信越支部大会、長岡技術科学大学、平成22年10月2日
- [4] T. Inoko, S. Sasaki, Acquisition Performance in DS/UWB Packet Radio Communications, 2011 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Gyeongju, Korea, 2011年6月21日
- [5] 猪子卓也、佐々木重信: DS/UWB 無線パケット伝送における同期捕捉の精度に関する一検討、電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会、関西学院大学大阪梅田キャンパス、2013年3月8日

[その他]

ホームページ等

<http://telecom0.eng.niigata-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 重信 (SASAKI SHIGENOBU)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 20242399

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし