慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	複数の普及型SDR受信機を用いた後付け無線測位システムの実現
Sub Title	Plug-in localization system using multiple commercial-off-the-shelf software defined receivers
Author	三次, 仁(Mitsugi, Jin) 佐藤, 友紀(Sato, Yuki) 矢加部, 眞碩(Yakabe, Mahiro)
Publisher	
Publication year	2022
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2021.)
JaLC DOI	
Abstract	複数の市販SDR装置を組み合わせてアレイアンテナを作成するシステムについて、制御PCとSDR装置間のバス遅延ジッタ改善、複数SDR装置の組み合わせによる三次元測位への拡張、通信プロトコルと同期したモノパルス制御の 3 項目に取り組んだ。通信ジッタに関しては相関係数 9 割以上のフレーム同期が可能であることが明らかにした。複数のSDR装置を組み合わせて様々な要素数をアレイアンテナを構成するために、市販のRFスイッチの利用が有効であることを示し、さらに入出力ポート数がスケーラブルとなる装置も考案開発した。またRFID通信プロトコルの進行と同期して、RFタグの到来方向検知を実施する装置を実現した。 The objective of this research is to realize an array antenna by combining multiple commertial off-the-shelf software defined radio equipments. The important problem of phase ambiguity is solved by our pantented technology called monopulse switching. Core research topics are 1. the compensation of communication jitter between SDR devices and host PC, 2. combining multiple SDR devices, and 3. Synchronized monopulse switching with communication protocol. The communication jitter problem was solve by concatenating individial carrier recovery circuit and correlator using overlapped ringbuffer. An antenna switch circuit comprises unit 2x2 monopulse switch circuits was invented. The synchronized monopulse switching is demonstrated with UHF RFID communication protocol to realize simultaneous inventory and AoA detection.
Notes	研究種目 : 基盤研究 (B) (一般) 研究期間 : 2019 ~ 2021 課題番号 : 19H02143 研究分野 : 無線通信、計算工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_19H02143seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　４ 年　 ６ 月 ２１ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2019～2021
課題番号：１９Ｈ０２１４３

研究課題名（和文）複数の普及型SDR受信機を用いた後付け無線測位システムの実現

研究課題名（英文）Plug-in localization system using multiple commercial-off-the-shelf software defined receivers

研究代表者
三次　仁（MITSUGI, Jin）

慶應義塾大学・環境情報学部（藤沢）・教授

研究者番号：４０３８３９２１

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　12,800,000円

研究成果の概要（和文）：複数の市販SDR装置を組み合わせてアレイアンテナを作成するシステムについて、制御PCとSDR装置間のバス遅延ジッタ改善、複数SDR装置の組み合わせによる三次元測位への拡張、通信プロトコルと同期したモノパルス制御の３項目に取り組んだ。通信ジッタに関しては相関係数９割以上のフレーム同期が可能であることが明らかにした。複数のSDR装置を組み合わせて様々な要素数をアレイアンテナを構成するために、市販のRFスイッチの利用が有効であることを示し、さらに入出力ポート数がスケーラブルとなる装置も考案開発した。またRFID通信プロトコルの進行と同期して、RFタグの到来方向検知を実施する装置を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
アレイアンテナを構成するためには、RF伝送路の位相を信号処理部で合致させる必要があるため、通常は単一のPLLを用い、クロックと位相が同期した信号をそれぞれの要素アンテナに提供する必要がある。このためどうしても用途限定で、製造コストが高くなってしまう問題が回避できない。市販SDR装置を複数組み合わせてアレイアンテナを構成し、たとえば方向検知などが実現できれば、用途や時期に合わせてアンテナ数を増やしたり減らしたりできるため便利であり、受信限定の安価なデバイスとPCによる信号処理を組み合わせれば、コスト・価格的にも有利である。こうした構成を実現する本研究の意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to realize an array antenna by combining multiple commertial off-the-shelf software defined radio equipments. The important problem of phase ambiguity is solved by our pantented technology called monopulse switching. Core research topics are 1. the compensation of communication jitter between SDR devices and host PC, 2. combining multiple SDR devices, and 3. Synchronized monopulse switching with communication protocol. The communication jitter problem was solve by concatenating individial carrier recovery circuit and correlator using overlapped ringbuffer. An antenna switch circuit comprises unit 2x2 monopulse switch circuits was invented. The synchronized monopulse switching is demonstrated with UHF RFID communication protocol to realize simultaneous inventory and AoA detection.

研究分野：無線通信、計算工学

キーワード：到来方向推定　ソフトウェア無線　位相補償　マルチパス

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

無線通信において複数のアンテナ・受信機を用いた電波到来方向検知の研究は広く行われており、複数のアンテナ・受信機を用いることで干渉波抑圧、複数の到来方向検知、三次元測位も可能である[1, 2]。搬送波位相を用いる電波到来方向検知では、それぞれの受信機での相対的な位相差が計測可能であることを前提としており、この前提を実現するためには、一つのクロック源から Phase Locked Loop（PLL）で所望の周波数を得て、その周波数を位相が同期するように配線長に注意しながら複数の受信機に分配することが行われる。クロック源を分配して、受信機毎に配備した PLL で所望の周波数を得ることもできるが、その場合、PLL 内では逓倍・分周を含むフィードバックループを用いているため所望周波数の絶対位相を受信機間で合わせることはできなかった。したがって、受信機毎に PLL を配備する場合には、それぞれの受信機を起動するたびに、既知のトーン信号を同相入力するなどして、受信機の絶対位相を調整する必要がある[3]。この問題は Phase Ambiguity と呼ばれている[4]。

RTL-SDR をはじめとして、安価（実売価格 1500 円程度）な普及型ソフトウェア無線受信機(SDR 受信機）が簡単に入手でき、RaspberryPie に代表される低価格 PC で MATLAB や GNU-Radio を用いて信号処理できるようになったが、この Phase Ambiguity の問題があるため、普及型 SDR 受信機を用途に合わせて複数用いて電波到来方向検知、干渉波抑圧や測位を行うことは困難、あるいは頻繁な校正を行う必要があり面倒、という課題があった。

２．研究の目的

本研究の目的は複数の受信機を組み合わせて用いる際の Phase Ambiguity 問題を頻繁な校正を伴わない方法で根幹的に解決すること、そして、その結果得られる機能・性能を実証することである。

３．研究の方法

目的実現に向けた基本的なアイデアは、SDR 受信機とアンテナ間に RF スイッチを挿入し、それを瞬間的に切り替えて差を取り、絶対位相差を取り除くことにある。提案者はこの方式をモノパルススイッチングと呼び、本研究開始前に、特許申請し、基本動作確認を完了していた。本研究では、この基本アイデアをより実用的な技術とするため、研究項目を以下の３つに分類し、取り組んだ。

(1)　SDR 受信機と制御 PC 間の伝送ジッタを考慮したモノパルススイッチング

(2)　複数 SDR 受信機による三次元測位への拡張

(3)　通信プロトコルに適応したモノパルススイッチングのタイミング制御

４．研究成果

(1) 制御 PC と安価な USB ハブを介して普及型 SDR 受信機を複数結合し、Phase Ambiguity 以外の伝送ジッタの実態について観測した結果、最短 17 msec、最長 45 msec、平均 33 msec でリセットの度にばらつくことを明らかにした。この問題に対して、SDR 受信プログラム側で、オーバーラップするリングバッファを構成し、基準フレームから遅れても進んでも相関解析ができるように実装した。しかし、この状態では、送信電波のキャリアリカバリができていないため、IQ コンステレーションは回転してしまい、そのまま相関解析すると、相関値が周期的に高くなってしまうため、うまくいかない。そこで、まずは周波数逓倍などでキャリアリカバリを行い、その後にリングバッファで USB バスの遅延を補正すると、図 1 のように同期できる。この実験は RF 周波数 916.8MHz で 10kbps の BPSK 信号を送信し、2 つの普及型 SDR 装置でそれぞれ受信サンプルレート 1MHz で実施した。

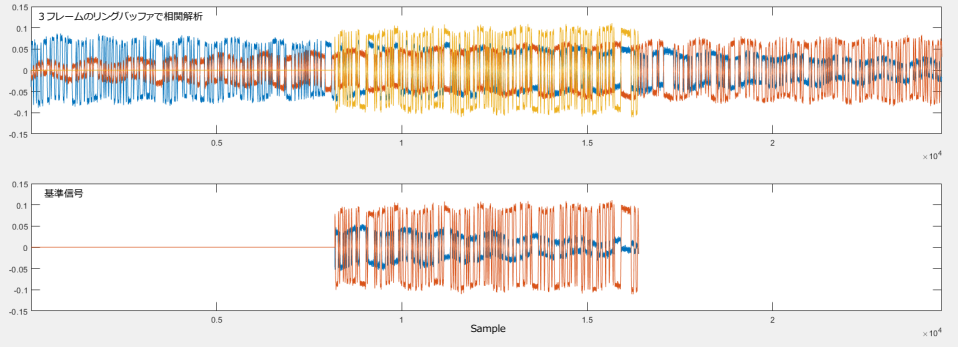

図 1　同期検波とオーバーラップリングバッファを用いた 2 つの IQ データの同期例

同期精度を高めるためにこの他にも IQ データの独立な相関解析を実施し、相関係数が高い成分を選択する工夫も行った。当然であるが、同期を維持するためには普及型 SDR 装置のクロック原振が分配されている必要がある。こうした工夫による相関値の改善効果は図 2 のように定量化できた。

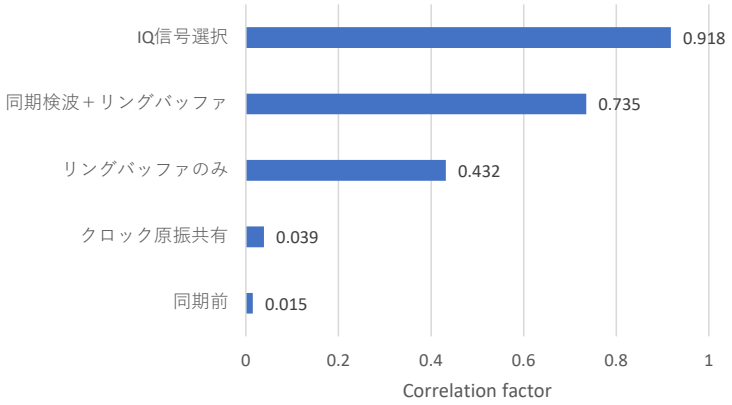

図 2　同期を確保するための工夫の定量的な貢献度

(2) 2台以上の SDR 装置のモノパルススイッチを行うためにまず既存の RF スイッチ評価ボードを組み合わせた装置を作成し、USRP の FPGA 制御によりスイッチを切り替えて、spatial smoothing を行うことによりマルチパスに対してもロバストな方向検知ができることを確認した（図 3)。

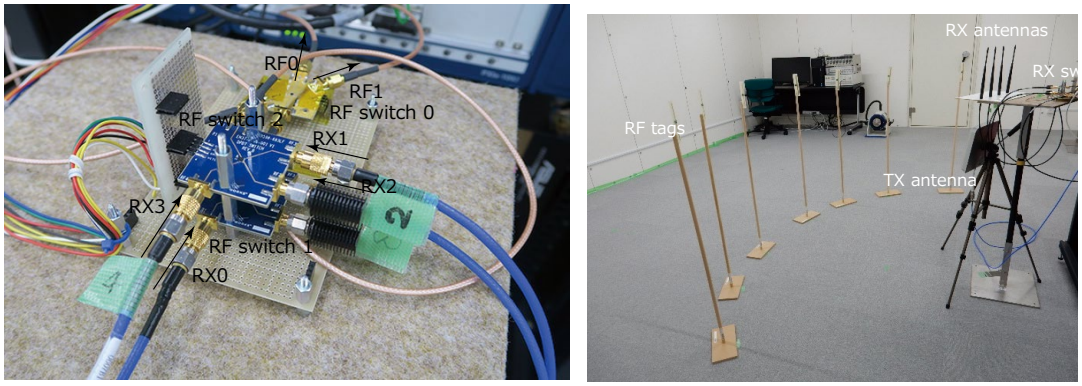

図 3　4入力モノパルススイッチ装置と RF タグ方向検知実験の様子

この実験により4入力モノパルススイッチ装置は、実験のための接続が難しいうえに厳密には線路長による位相差もあり、さらに入力数を増やそうとした場合に、構造的に問題があることも分かった。そこで、2 x 2の基本モノパルス基板を組み合わせることで4 x 4や8 x 8のモノパルススイッチを構成できる構造を考案し、試作した（図 4)。現在通信プロトコル制御装置と組み合わせて動作を確認中である。なお、モノパルススイッチに関する基本特許は登録が完了した。

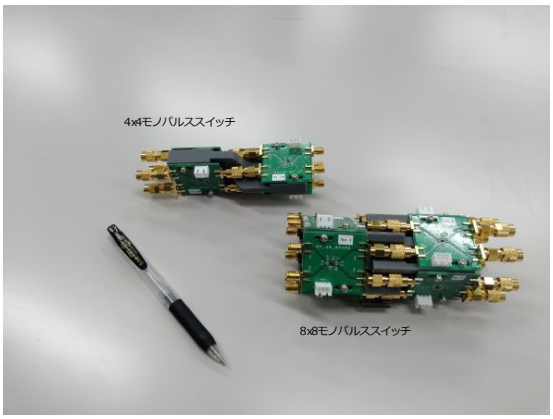

図 4　スケーラビリティを有するモノパルススイッチ装置試作品

(3) 通信プロトコルと同期して適切なタイミングでモノパルススイッチを切り替えることを、通信時間のタイミング制御が厳しい RFID プロトコル(ISO/IEC 18000-63)について USRP の FPGA プログラミングによって実装・評価した。図 5 は時間波形であり Target A と呼ばれる読み取り Window の後に Target B でモノパルススイッチが切り変わっているために IQ 信号が不連続に変化する様子が示されている.

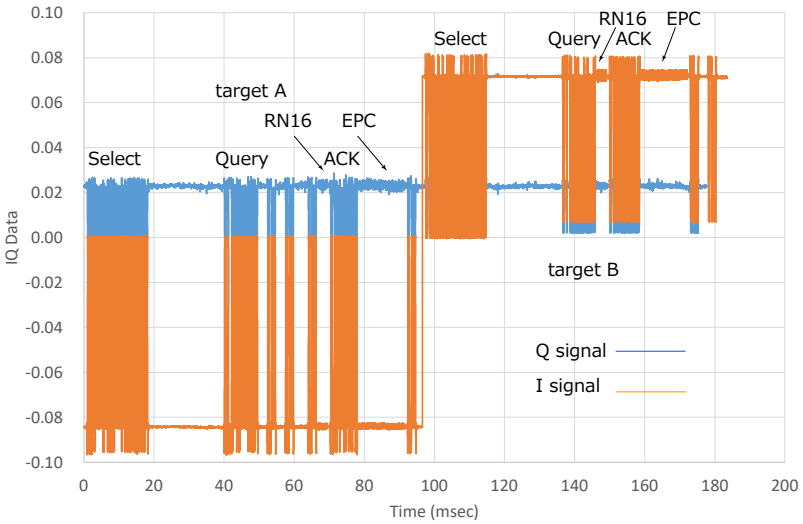

図 5　通信プロトコル動作中のモノパルススイッチ動作の観測

これにより、複数の RFID タグの方向検知を高速ＩＤ読み出しながら、同時に実施できることが実験的にも明らかになった。

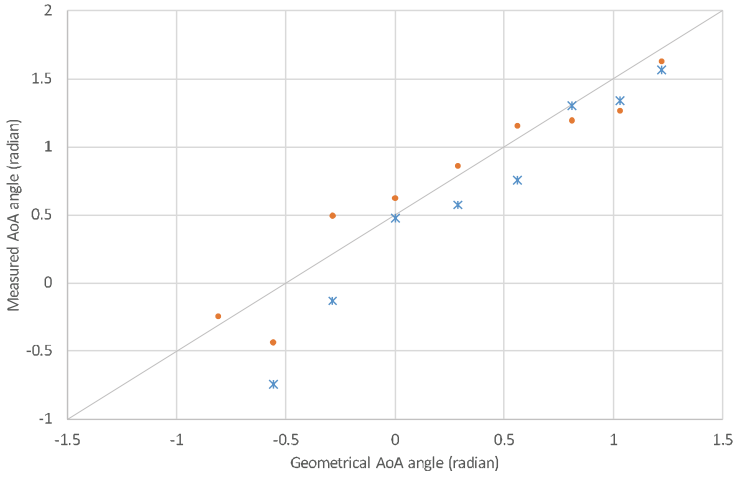

図 6　モノパルススイッチによる到来角推定精度

[1] 菊間信良、"アダプティブアンテナ技術"、オーム社、(2003).

[2] Nikitin,P., "Localization in UHF RFID, Ranging Methods Overview", IEEE RFID 2011, Workshop on Tag Localization in Passive UHF RFID, (2011).

[3] Chen,H.,C., Lin,T.,H., Kung,H.,T.,Lin,C.,K.,Gwon,Y.,"Determining RF Angle of Arrival Using COTS Antenna Arrays: A Field Evaluation", 2012 IEEE Military Communications Conference, (2012), pp.1-6.

[4] Ettus Research, "Synchronization and MIMO capability with USRP devices", Application Note, Ettus Research, (2016).

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計0件

〔学会発表〕　計4件（うち招待講演　0件／うち国際学会　2件）

１．発表者名 Jin Mitsugi
２．発表標題 Simultaneous Gen2 Inventory and Angle of Arrival Measurement of Backscatter Signals with Multiple Commodity SDRs
３．学会等名 IEEE International Conference on RFID（国際学会）
４．発表年 2020年

１．発表者名 三次　仁
２．発表標題 バックスキャッタ通信を用いた同期無線データストリーミング
３．学会等名 電子情報通信学会ソサイアティ大会
４．発表年 2020年

１．発表者名 Jin Mitsugi
２．発表標題 Simultaneous Gen2 Inventory and Angle of Arrival Measurement of Backscatter Signals with Multiple Commodity SDRs
３．学会等名 IEEE Journal of RFID（国際学会）
４．発表年 2021年

１．発表者名 矢加部　眞碩、三次　仁
２．発表標題 複数COTS-SDRの受信IQ信号の高精度な同期方法
３．学会等名 電子情報通信学会　2022年総合大会
４．発表年 2022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
研究分担者	佐藤　友紀 (SATO Yuki) (80801802)	慶應義塾大学・政策・メディア研究科（藤沢）・特任助教 (32612)	2019年度末で退職

	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
研究協力者	矢加部　眞碩 (YAKABE Mahiro)		

７．科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕　計0件

８．本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関