

# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-26

## 多入力多出力音響信号処理による位置情報検出に関する研究

郜, 文参 / GAO, Wenshen

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

61

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2020-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022832>

# 多入力多出力音響信号処理による 位置情報検出に関する研究

## A STUDY OF MIMO SOUND SIGNAL PROCESSING FOR OBJECT POSITION DETECTING

鄒文参

Wenshen GAO

指導教員 安田彰

法政大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 修士課程

Recently, more and more portable devices and software applications that interact with human are being developed. The needs for detecting position information are growing rapidly in both amount and accuracy. Approaches that using RF signals or light for active probing, analyzing the reflected signals by deep-learning attract the most attention. However, in order to realize a practical portable device, cost and hardware requirements must be reduced. In this paper, a position detecting system is proposed. By sending chirp signals via ultrasound speakers and receiving the reflection using MEMS microphone array, then position info can be reconstructed by digital signal processing.

**Key words:** beamformer, digital signal processing, phased array, ultrasound

### 1. はじめに

現代技術の急速な発展すると共に、電子機器が人間とインタラクティブ動作することは従来より大幅に増加し、位置情報の取得は重要な課題である。近年、アプリケーション側に対し、センサからの情報の種類は一次元シングルレートの信号から多次元マルチレート信号に移行されてきており、ディープラーニングによる処理することも増えている。電波、光あるいは音声信号がメインに使用された簡単なパルス信号によるエコーロケーションから、送受信アレイを使った複雑なレーダーシステムまで、様々な手法が存在している。

その一方、電子製品の競争は一時も止まらず、持続可能な技術になる要素の一つは、コストである。良いアイデアとしても安く実現できないと、幅広く応用されることが難しい。また、ポータブル製品に搭載するために体積と消費電力を抑えなければならない。

デジタル信号処理技術の充実と MEMS(Micro Electronic Mechanical System) マイクの実用化により、以上の問題をバランスよく解決することが可能となる。本論文では、スピーカ、MEMS マイクアレイを用い、周波数掃引した超音波帯域の音響信号とデジタル信号処理の組み合わせた位置検出手法を提

案した。

本提案を使えば、コストを抑えながら、3次元の位置情報検出が可能なシステムをポータブル製品に搭載する可能を明示する。

### 2. 従来手法

#### (1) 電波レーダー

電波レーダーは RF(Radio Frequency) 信号を用い、物体の位置や速度などの情報を検知するシステムである。単入力単出力、アクティブ式のを代表とし、基本構成を図1に示すことができる。

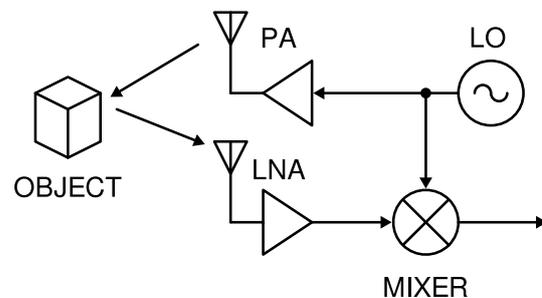


図1 電波レーダーの基本構成

その原理としては、送信部から電波を発射し、進行方向に沿って伝わり、物体とぶつくと反射さ

れる。折り返した信号が受信部に受信し、送信信号との変化から、物体の距離情報を算出することができる。よく使われている信号は、周波数掃引連続波(FMCW)、パルス波などである。また、方向情報を検知する場合、電波の方向を回転させ、目標距離を繰り返し計測すれば、2次元または3次元の情報を取得することができる。

現在、機械的な回転を使わず、複数のアンテナでアレイを構成し、アンテナ間の信号の位相とゲインを制御する場合もある。よって、合成した信号の方向はそれに応じて変化する。ビームを電気的に回転させることが可能となる。これはフェーズドアレイと言われ、車載の衝突防止レーダーはこの方式の一つ例である。

電波レーダーでは、すべての処理している信号は電気信号であり、デジタル信号処理とLSI技術の発展することにより、従来のアナログ受送信方式に代わり、全デジタル受送信方式のレーダーの普及にいたっている。

## (2) LIDAR

LIDARは光検出と測距という意味で、電波の代わり光を用いたレーダーと類似した技術である。その基本を図2に示す。

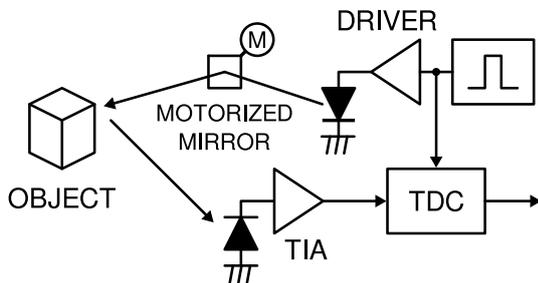


図2 LIDARの基本構成

まず、光源からパルスを出し、物体で反射された光をセンサで拾う。この信号と出した信号の時間差から、往復時間を算出する。光の伝搬速度が速いため、人間との距離測定においては、この時間差はほぼpsからnsオーダーであるため、普通のカウンタで計測する方法では足りなくなる。それを検出するには、TDC(Time-to-Digital Converter)がよく使われている。検出する次元を2次元あるいは3次元に拡張する場合、光の回転を行う。しかし、光を電気的な回転にすることは非常に難しく、メカニカル機構を使って回転させることが一般的である。光は直進性が強いという性質を持ち、方位情報の高精度な検出を実現できる。このため、LIDARは自動運転やロボットのセンシングなどの領域で活躍している。そして、LIDARは電波資源を使わないため、よ

り自由に適用できるという長所がある。

## (3) 超音波エコーロケーション

超音波エコーロケーションは、超音波の伝搬特性を利用した位置検出方式である。代表的なのは、ピエゾ素子をトランスデューサとし、パルスラインで駆動するシステムである。その基本構成を図3で表現することができる。

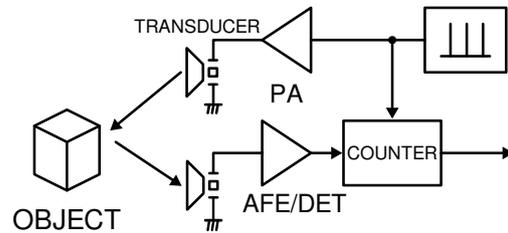


図3 超音波エコーロケーションの基本構成

まず、送信用トランスデューサから、パルスラインを送信する。物体の反射波は受信トランスデューサに到達し、電気信号に変換される。その後、パルスラインが検波回路を通し、包絡に変換され、送信開始との時間差を検出することによって信号の往復時間を計測する。応用例としては水位計や衝突防止などがある。

## 3. 問題点

以上に列挙した技術は、それぞれ長所を持っているが、人間の検出を用途としてポータブル製品に搭載しようとする時、問題が現れる。

電波レーダーを用いるとき、電波スペクトラム資源を占めることになる。その希少性に応じ、世界各国は立法で使用する周波数帯域やパワーなどを規制している。規定に合わせて免許や技術認証を取るには、製品のコストが増えるわけである。

LIDARは電波資源を使わない。しかし、メカニカル回転部が存在しているため、精密な加工と組み立てが必要で、小型化は難しい。また、回転の騒音および光源が人間を照射による影響、小型製品にも応用しにくいなどの問題点がある。

超音波エコーロケーションに使うピエゾ素子は、共振周波数付近で動作する。このため、信号の帯域不足という問題の影響により、高速な測定が実現できない。また、ピエゾ素子の体積はより大きいため、ポータブル製品には搭載が難しい。

## 4. 提案手法

ここまでの問題を解消するために、スピーカとMEMSマイクアレイを用い、周波数掃引した超音波帯域の音響信号とデジタル信号処理を組み合わせ

た位置検出手法を提案する。本提案では、スピーカと MEMS マイクは現在のスマートホンやタブレットにすでに搭載されているため、ハードウェアコストを最小限に抑えることができる。

### (1) 測定原理

まず、超音波の空気中での伝搬速度  $c$  は、式 (1) で近似計算することができる。ここで、 $T$  は温度  $^{\circ}\text{C}$  である。

$$c = 331.5 + 0.6 T \text{ [m/s]} \quad (1)$$

一般には室温が  $25^{\circ}\text{C}$  の時、約  $346.5\text{m/s}$ 、つまり  $1\mu\text{s}$  の間に、 $346.5\mu\text{m}$  のみ進行する。これは論理回路で十分に計測できる範囲内のため、ミリメートルレベルの高精度な測定が可能となる。

超音波の性質については、式 (2) を用いて計算することができる。ここで、 $c$  が伝搬速度、 $f$  が周波数。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

例えば  $20\text{kHz}$  の超音波に対し、波長は  $17.325\text{mm}$  である。電波と比べると、同じ波長の電波の周波数は  $17.3\text{GHz}$  である。この観点から、周波数を掃引したワイドバンドな超音波レーダーは、ミリ波レーダーと似ている性質を持っていることが予想できる。

それから、超音波の受信器を等間隔、直線に配置した場合、角度分解能は式 (3) で表すことができる。

$$\Delta\theta = 0.866 \frac{\lambda}{L} \text{ [rad]} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  が超音波の波長、 $L$  がアレイの全長である。この式から、波長が短くて受信アレイのサイズが大きい方は、角度分解能が高いが、製品のサイズの制限と共に考えればよい。

最後に、受信アレイを設計する際に、ビームフォーミングによる空間エイリアシングを回避するために、センサの間隔は、式 (4) のように満たさなければならない。

$$d_x \leq \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

### (2) ハードウェア構成

図 4 は提案のハードウェア、そのうち送信部、受信部と通信部で構成されている。物体検出のために、

DDS(Direct Digital Synthesis) で生成した周波数掃引信号をデジタル直接駆動でスピーカから出力する。それから、物体に反射した信号を MEMS マイクアレイで取得し、ビームフォーマを用いて指向性を制御する。指向性を制御した信号をシステムバスを経由し、さらにメインプロセッサで位置情報を算出する。具体的な各部分の仕組みは以下のセクションで説明する。

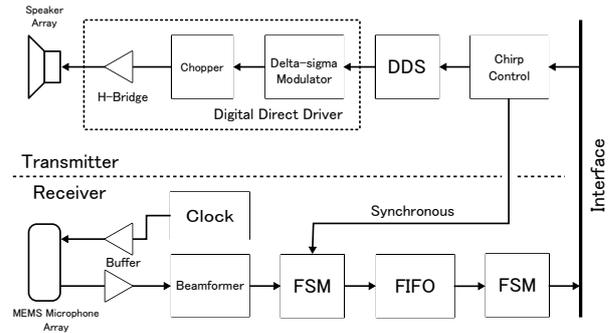


図4 提案システム

#### a) 送信部

まず、メインプロセッサからの開始命令は、システムバスからチャープ制御ブロックに伝わる。チャープ制御により、DDS が周波数掃引連続波 (FMCW) のデジタル信号を生成する。その後、生成した信号をデジタル直接駆動回路でマルチビットのパルス密度変調信号 (PDM) に変換し、Hブリッジ回路でスピーカアレイを駆動する。最後に、スピーカで電気信号から超音波に変換する。

#### b) 受信部

スピーカから出力した FMCW 超音波は、空間にそって伝搬し、物体にぶつくと反射する。反射波は MEMS マイクアレイに到達し、電気信号に変換される。その後、ビームフォーマにより、各マイクが拾った信号の位相と振幅を調整する。調整された信号を加算し、開始時点の信号と同期を取ってからシステムバスに接続する。

#### c) 通信部

通信部はシステムバス、FIFO(First-In First-Out) メモリ及び各ブロックの相互通信をサポートする部分で構成されている。ブロックごとのアドレス分配とリードライト制御も通信部で管理する。

### (3) デジタル信号処理

信号に対する演算処理は、すべてデジタルで行う。これは二つ部分に分けることができる。一つ目はリアルタイムに処理が必要な部分でハードウェアで処理する。二つ目の非リアルタイム演算の部分は汎用プロセッサで処理する。

### a) FMCW 信号の生成

FMCW 信号はのこぎり波に変調された正弦波、振幅は一定である。のこぎり波をベースバンド信号とし、そのイメージを図 5 に示す。それで DDS を制御し、正弦波を出力する。この正弦波の周波数と制御信号の関係は、式 (5) で表現できる。

$$f_{out} = \frac{\Delta P f_{clk}}{2^j} \quad (5)$$

ここで、 $f_{out}$  が正弦波の周波数、 $\Delta P$  が DDS の制御入力、 $f_{clk}$  が DDS のメインクロック周波数、 $j$  が DDS の位相アキュムレータのビット幅である。

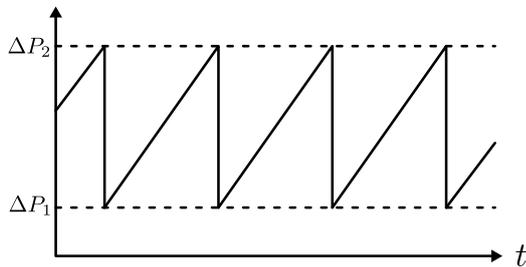


図5 DDS の制御信号

### b) デジタル直接駆動回路

生成した正弦波サンプル系列から、超音波を出す前に一連の変換が必要である。まず、デジタル値をデジタル直接駆動回路に通し、マルチビット PDM 信号に変換する。次に、スピーカアレイの mismatches を軽減するために、チョッパーで mismatches ノイズを分散化する。この信号を H ブリッジでパワー信号に変換し、スピーカアレイを駆動する。デジタル直接駆動では、D/A 変換器とアナログアンプを使わず、デジタル音源の信号からスピーカまで、単一の CMOS LSI だけで低電圧かつ大電力の出力を実現できる。

### c) ビームフォーミング

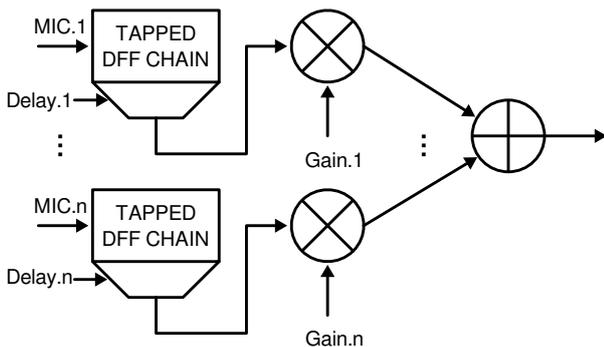


図6 ビームフォーミングの構成

MEMS で取得した反射波をその内部の 1 ビット Delta-Sigma 変調器でデジタル信号に変換し、ビームフォーマを用いて指向性の制御を行う。ビームフォーマの構成を図 6 で示すことができる。

ビームフォーマの出力を式 (6) に示す。N がチャンネル数、d が遅延サンプル数、k がゲインである。

$$Y(z) = \sum_{i=1}^N k_i z^{-d_i} X_i(z) \quad (6)$$

信号の指向性を制御することにより、電氣的にビーム回転させ、空間上の掃引を実現した。ここでのビームフォーマの入力は 1 ビット PDM 信号であるため、遅延とゲインを調整が容易になり、ハードウェア資源の使用を大幅に抑えることができ、消費電力も削減になる。

### d) デシメーション

指向性制御できた信号のデータレートはまだ高く、汎用プロセッサに処理するには不便である。そこで、デシメータを利用してデータレートを落とすと同時にビット数を増やす。

デシメーションの実現方法の中、効率がよいのが CIC (Cascaded Integrator-Comb) フィルタである。まず、信号を CIC フィルタで有用帯域以外の成分を遮断し、ダウンサンプリングをする。次に HB-FIR (Half-Band Finite Impulse Response) フィルタで CIC フィルタによる帯域内の損失を補償および帯域外信号を除去し、最後の 2:1 のデシメーション処理を行う。

デシメータの構成を図 7 に示す。

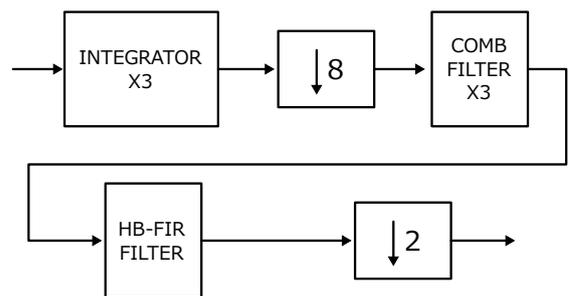


図7 デシメータの構成

### e) ポストプロセス

デシメーションまではハードウェアによる信号処理し、これを汎用プロセッサに伝送し、Raw データにポストプロセスを行い、アプリケーション層で利用できる情報にする。

ここで、デシメータの出力信号と、FMCW 信号のサンプル系列を掛け算し、フレームごとに移動平均を計算する。これによって、目標の位置情報を載せ

た反射波の時間軸情報を圧縮する。これによりパルス圧縮を利用し、時間軸のオフセットを検出し目標までの距離を精度良く検出できる。

また、パルス圧縮の他、さらに高い検出レートが必要な場合、以下の処理手法が利用できる。まず、入力ストリームを短区間に分割し、各区間を高速フーリエ変換 (FFT) を用いて変換する。次に、変換したスペクトラムのビン軸に、あらかじめ計算したオフセットを加えることにより、ビンのずれを補償する。この結果、距離の検出精度にトレードオフの関係になり、パルス圧縮より高い検出レートを得ることができる。

最後に、検出レートと高信号体雑音比 (SNR) のバランスを調整したい際、掃引周期長内の各 FFT の結果を加算すると、各区間の反射信号のピークが加算によって増強され、ノイズは平均化により低減されるため、SNR が改善されている。

## 5. 結果

### (1) 実験装置

図 8 は、基板の写真である。実験用のコードは Verilog HDL で作成し、シミュレーションを行い、Vivado を用いて論理合成した。ハードウェアプラットフォームは設計した PCB, Xilinx 社の Kintex-7 シリーズ FPGA を搭載された FPGA ボードを組み合わせ構成された。

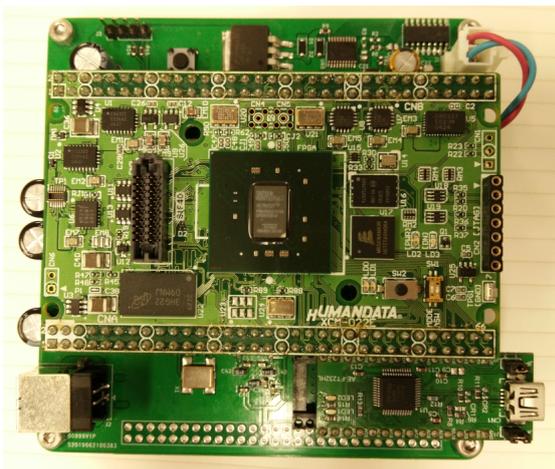


図8 実験基板

超音波に応答するマルチアレイとシングルユニットの超音波スピーカ、二種類を使って実験した。MEMS マイクは TDK 社と Knowes 社、二種類を使って実験した。ハードウェア上の信号処理を FPGA で実行し、USB を経由して PC に伝送した。最後に Python で作成したコードで分析する。

### (2) 設計とシミュレーション

図 9 は、ビームフォーマのシミュレーション結果である。時間がずれた入力信号を遅延をかけて同一のタイミングに出力した。

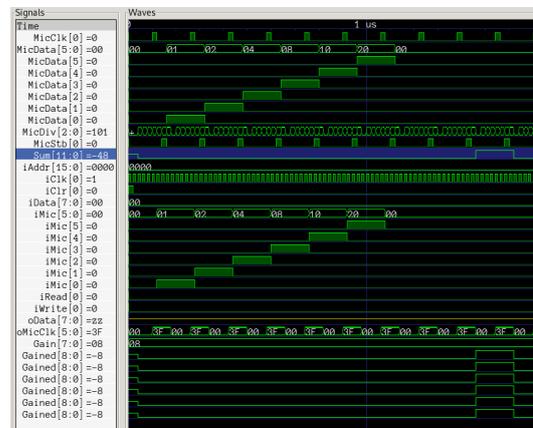


図9 ビームフォーマのシミュレーション結果

図 10 は、デシメータのシミュレーション結果である。擬似 PDM 信号を入力し、デシメーションしたことを確認した。

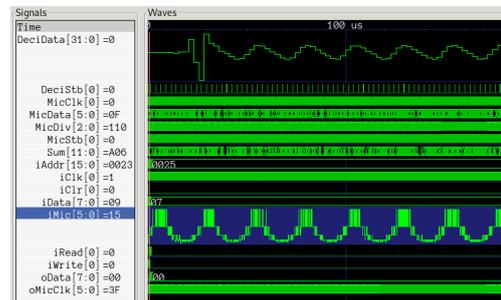


図10 デシメータのシミュレーション結果

図 11 は、デシメーションフィルタの応答特性である。縦のラインは FMCW 信号の周波数範囲を示している。ここで、遠方信号の減衰を補償するため、高い周波数のほうにエンファシスを加えた。

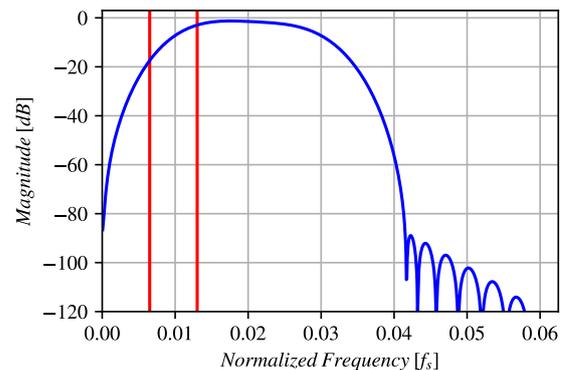


図11 デシメーションフィルタの応答特性

### (3) 実験データ

提案したシステムを実装し、無響室で実験を行った。試験者を目標とし、スピーカと MEMS マイクアレイの前に立った。信号処理後のデータのスペクトラムを図 12 に示す。

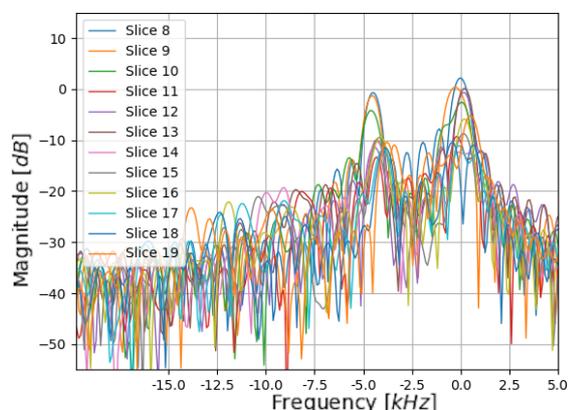


図12 実測データ

図の中に、連続にキャプチャしたデータをポストプロセスし、その内の 12 スライススペクトラムを重ねて表示した。0 kHz にあるピークは送信信号が直接受信された結果、-5.0 kHz 付近のピークが目標の反射波である。

## 6. まとめ

本論文では、スピーカ、MEMS マイクアレイを用い、周波数掃引した超音波帯域の音響信号とデジタル信号処理の組み合わせた位置検出手法を提案し、シミュレーション検証と実験検証を行い、提案の有

用性を証明した。

今後の課題としては、本システムをさらに実用化した上、信号の統計的特性を利用、または信号処理を多次元化することで、さらに高度な位置情報抽出手段を実現することである。

### 謝辞：

本研究を進めるにあたり、ご指導ご協力いただいた法政大学理工学部電気電子工学科安田彰教授に心から感謝いたします。また平素、様々なアドバイスをいただいた仲間の皆様に感謝しております。

### 参考文献

- [1] 浅野太, 「音のアレイ信号処理」, コロナ社, 2011
- [2] 鄒文参 西勝聡 安田彰, 「周波数掃引を用いた位置検出装置における SNR を改善の一手法」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-5-8, 2019
- [3] Richard Schreier, Gabor C. Temes 著 和保考夫, 安田彰 監訳, 「 $\Delta\Sigma$  型アナログ/デジタル変換器入門」, 丸善 2007
- [4] Jouko Vankka, “Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications”, ISBN 951-22-5232-5, 2000
- [5] M. Zhao, T. Li, M.A. Alsheikh, Y. Tian, H. Zhao, A. Torralba, D. Katabi, “Through-wall human pose estimation using radio signals”, Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 7356-7365, 2018.
- [6] Richard G. Lyons, “Understanding Digital Signal Processing”, Third Edition, Prentice Hall, 2011