

# Detektion der Atembewegung mit einem Radarsystem

Di Shi, Taimur Aftab, Gunnar Gidion, Leonhard M. Reindl, Stefan J. Rupitsch

Institut für Mikrosystemtechnik, Universität Freiburg, Georges-Köhler-Allee 106, 79110 Freiburg, Deutschland,  
[di.shi@imtek.uni-freiburg.de](mailto:di.shi@imtek.uni-freiburg.de).

## Kurzfassung

Mit Hilfe eines speziellen Radarsystems, einem sogenannten Bioradar, kann die Atembewegung eines Überlebenden durch Trümmerschichten hindurch detektiert werden. Im Rahmen des SORTIE-Projekts wurde an der Universität Freiburg ein miniaturisiertes Bioradarsystem auf Basis eines „Software-Defined-Radio“ entwickelt. Das System kann mit Hilfe eines unbemannten Flugsystems ein für die Einsatzkräfte schwer begehbares eingestürztes Trümmerfeld schnell punktweise durchsuchen. In diesem Beitrag wird das Messprinzip, der Aufbau und die Signalverarbeitung des entwickelten Bioradars vorgestellt. Darüber hinaus werden Ergebnisse aus Feldversuchen präsentiert.

## Abstract

A specialized radar system, the so-called bioradar, can detect the breathing movement of a survivor through layers of rubble. As part of the SORTIE project, we have developed a miniaturised bioradar system based on a software-defined radio at the University of Freiburg. With the help of an unmanned aerial system, the system can quickly point-by-point search a collapsed rubble field, which might be difficult for the rescue staffs to access. In this contribution, we present the measurement principle, setup and signal processing of the developed bioradar. Furthermore, we present some results from field tests.

## 1 Einleitung und Motivation

Im Fall von Naturkatastrophen, insbesondere Erdbeben oder technischen Schadenfällen, benötigen Einsatzkräfte für die Rettung von Verschütteten aus den Trümmern eingestürzter Gebäude sowohl eine umfassende personelle Vorbereitung als auch eine zuverlässige technische Ausrüstung. Das Projekt SORTIE<sup>1</sup> hat das Ziel, eine modulare Sensor-Plattform auf einem unbemannten Flugsystem (UAS, unmanned aerial system) zu entwickeln, die technische Systeme zum Auffinden von Überlebenden tragen kann. Durch die Ausführung als fliegendes Ortungsgerät können auch für die Einsatzkräfte schwer begehbare eingestürzte Strukturen durchsucht werden.

Ein Bestandteil des SORTIE Projektes ist die Entwicklung eines Dopplerradars mit geringer Masse zur Detektion von Atembewegungen von Überlebenden unter den Trümmerschichten. Dieses sogenannte Bioradar kann durch mehrere Meter nicht-metallischer Trümmerschichten hindurch die Atemfrequenz und die Entfernung zu den Überlebenden bestimmen. [1]

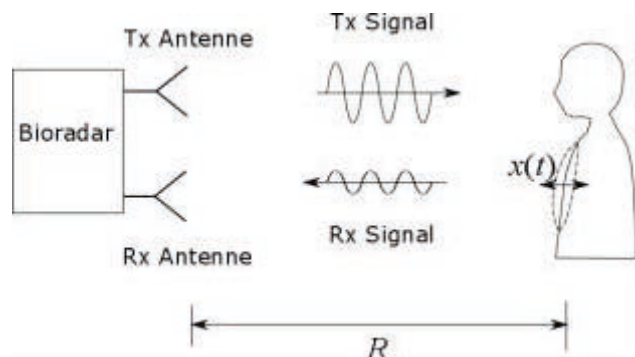
## 2 Messprinzip des Bioradars

### 2.1 Dopplerradar

Menschen atmen in Ruhe 6 bis 45-mal pro Minute, was einen  $f_{\text{atm}}$  von 0,1 bis 0,75 Hz entspricht. Säuglinge atmen am schnellsten und können im Ruhezustand bis zu 45 Atemzüge pro Minuten machen. Mit zunehmendem

Alter atmen die Kinder langsamer und erreichen als Erwachsene etwa 20-mal pro Minute. [3][4]

Das Messprinzip des Bioradars basiert auf dem Dopplereffekt. Bild 1 zeigt schematisch die Funktionsweise.



**Bild 1.** Veranschaulichung des Bioradar-Messprinzips.

Das Bioradar sendet und empfängt elektromagnetische Wellen. Ein Mensch befindet sich im Abstand  $R$  von den Sender- und Empfänger-Antennen. Die Phase  $\phi$  der elektromagnetischen Welle, die vom Sender zum Menschen und von diesem zurück zum Empfänger läuft, hängt von der Entfernung  $R$  und der elektromagnetischen Wellenlänge  $\lambda$  ab. Die menschliche Atmung ist eine annähernd periodische Bewegung.

Wenn der Mensch mit der Atemfrequenz  $f_{\text{atm}}$  atmet, ändert sich der Abstand  $R$  zwischen Radarsystem und seinem Brustkorb periodisch. Die Abstandänderung definieren wir als  $x(t)$ . Vereinfacht können wir  $x(t)$  als eine Sinusfunktion mit der Atemfrequenz  $f_{\text{atm}}$  repräsentieren

$$x(t) = x_{\text{max}} \sin(2\pi f_{\text{atm}} t). \quad (1)$$

<sup>1</sup> gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N15189

Die Abstandsänderung führt zu einer Phasenänderung der reflektierten Wellen und zu einer Frequenzänderung, die als Dopplerfrequenz  $f_D$

$$f_D = \frac{d\phi(t)}{2\pi dt} = \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (2)$$

bezeichnet wird, wobei

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = 2\pi f_{\text{atm}} x_{\text{max}} \cos(2\pi f_{\text{atm}} t) \quad (3)$$

gilt. Damit erhalten wir

$$f_D = \frac{4\pi}{\lambda} f_{\text{atm}} x_{\text{max}} \cos(2\pi f_{\text{atm}} t). \quad (4)$$

Deswegen ändert sich die Dopplerfrequenz  $f_D$  periodisch mit der Atemfrequenz  $f_{\text{atm}}$ . Während einer zweiminütigen Messung bleibt  $f_{\text{atm}}$  ungefähr konstant, wobei der Wert und das Vorzeichen von  $f_D$  periodisch wechseln.

Neben der Abstandsänderung ändert sich auch der Radarquerschnitt des Brustkorbs. Dadurch ändert sich nicht nur die Phase  $\phi$  der reflektierten Radarwellen mit  $f_{\text{atm}}$ , sondern auch die Amplitude  $A$ .

## 2.2 Frequenzkamm CW Radar

Zur Messung der Atemfrequenz reicht eine einzelne Trägerfrequenz. Eine zusätzliche Information über die Entfernung zur Quelle des Dopplersignals hilft, einen potentiell Verschütteten von weiteren Quellen zu unterscheiden, wie beispielsweise einer Rettungskraft oder von Wind bewegten Blättern. Zur Entfernungsauflösung  $\Delta R$  muss das Messsignal eine Bandbreite  $BW$  enthalten

$$\Delta R = \frac{c}{2BW}, \quad (5)$$

wobei  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle ist.

Das Bioradar des SORTIE Projekts verwendet hierzu einen Frequenzkamm, welcher durch eine kontinuierliche Wellenform  $s[l]$  mit  $M$  gleichmäßig verteilten diskreten Frequenzanteilen generiert wird, wobei  $l$  hier den Index der Abtastwerte im Zeitbereich darstellt:

$$f_{tx}[m] = \frac{BW}{M-1} \left( m - 0.5 - \frac{M}{2} \right), \quad (6)$$

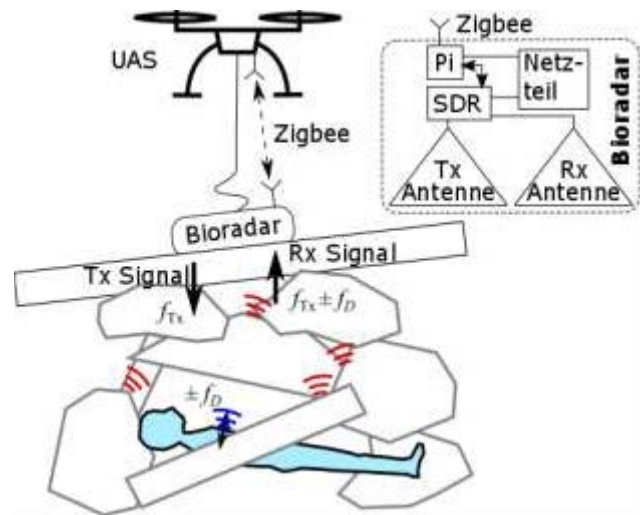
$$s[l] = \sum_{m=1}^M \cos\left(2\pi f_{tx}[m] \frac{l}{f_a}\right) + j \sin\left(2\pi f_{tx}[m] \frac{l}{f_a}\right). \quad (7)$$

Im Frequenzkamm werden alle  $M$  Frequenzen gleichzeitig ausgesendet. Alle Frequenzen werden aus einer gemeinsamen Frequenzquelle abgeleitet, an die auch der Empfänger gekoppelt ist.

## 2.3 Bodenradar

Bei einem Rettungseinsatz muss das Bioradar einen Verschütteten durch mehrere Meter Trümmerschichten hindurch detektieren. Es handelt sich daher um ein Bodenradar.

Der größte Anteil der ausgesendeten elektromagnetischen Welle wird von den Trümmerschichten gedämpft. Zusätzlich treten Reflektionen an jeder Materialgrenzfläche auf [5]. Daher ist das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis (SNR) im Empfangssignals niedrig. Die materialabhängige Dämpfung von elektromagnetischen Wellen steigt mit zu-



**Bild 2.** Blockdiagramm des SORTIE-Bioradar und ein Schema deren Einsatzszene.

nehmender Frequenz. Die benötigte Bandbreite kann jedoch bei höheren Frequenzen leichter realisiert werden [6]. Zudem können für höhere Frequenzen kleinere Antennen realisiert werden. Als Kompromiss arbeitet das Bioradar in SORTIE im 1,3°GHz Band und im 2,4°GHz Band.

## 3 Systembeschreibung

### 3.1 Konstruktion des Systems

In einem Vorgängerprojekt, FOUNT<sup>2</sup>, wurde ein in das UAS integriertes Bioradar entwickelt, das eine extrem niedrige Rauschzahl aufweist. Die Antennen wurden in die Füße des Landgestells integriert, um einen direkten Bodenkontakt der Antenne nach einer Landung sicher zu stellen. [7]. Jedoch kann nicht auf allen Trümmerfeldern ein sicherer Landplatz gefunden werden. Für diese Fälle wurde in SORTIE ein kleines autarkes Bioradar entwickelt, das an einem Seil vom UAS abgelassen werden kann (siehe Bild 2). Das UAS kommuniziert dabei mit dem Bioradar über Zigbee.

### 3.2 Bioradar auf Basis eines Software-Defined-Radio

Ein Software-Defined-Radio (SDR) ist ein Funkgerät, bei dem einige oder alle Funktionen der physikalischen Schicht über ein Programm eingestellt werden können [8]. Im Bioradar des SORTIE Projekts wird das SDR ADRV9364-Z7020 von Analog Devices [9] eingesetzt. Das SDR kann eine große Bandbreite abdecken. Es setzt eine Architektur mit Direktumwandlung mit nur einer Zwischenfrequenz ein. Dadurch kann es in Größe und Gewicht sehr kompakt realisiert werden. Die wichtigen Systemparameter für das SORTIE Bioradar sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Der Lokaloszillator (LO) des Empfängers und der LO des Senders sind phasenverriegelt durch die integrierten Phasenregelkreise (PLL).

Parameter	Symbol	Wert
Abtastfrequenz	$f_a$	61,44 MHz
LO-Frequenz des Empfängers	$f_{Rx}$	2,4 GHz
LO-Frequenz des Senders	$f_{Tx}$	2,4007 GHz
Wellenform des Senders	$s[n]$	siehe Gleichung (7)
Anzahl der Frequenzkamm-Töne	$M$	8
Messdauer	$T_{mess}$	circa 2 Minuten
Abtastungen pro Frame	$L$	4096
Anzahl der Frames	$N$	40k

**Tabelle 1.** Systemparameter des SDR.

## 4 Signalverarbeitung

### 4.1 Vorbereitung

Im Empfänger werden die reflektierten Signale komplex abgetastet und in der Form von Frames gespeichert. Im ersten Verarbeitungsschritt werden aus dem extrem breitbandigen Abtastsignal schmalbandig die Sendefrequenzen extrahiert. Hierzu wird zur Berechnung des Frequenzspektrums  $S_{Rx}$  eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) eingesetzt

$$S_{Rx}[k] = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L s_{Rx}[l] e^{-j \frac{2\pi}{L} kl}. \quad (8)$$

Nur die  $M$  Frequenzen, die in dem Frequenzkamm eingesetzt wurden, werden sodann weiterverarbeitet, wodurch sich die Anzahl der Frequenzpunkte stark reduziert.

Mit einer inversen Fourier Transformation (IFFT) kann das Spektrum aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich transformiert werden. Für  $M$  diskrete Frequenzen erhält man so  $M$  Abstände im Zeitbereich

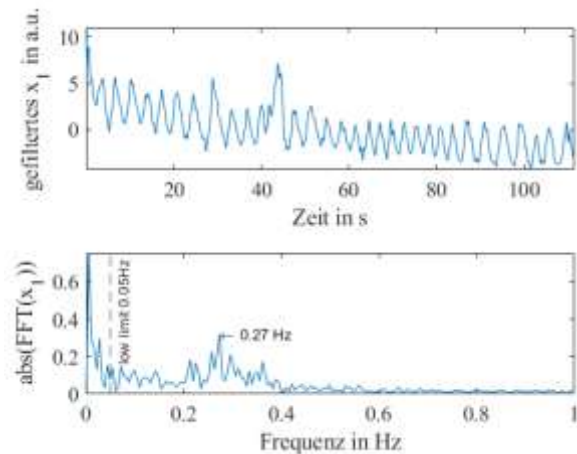
$$x_{Raum}[d] = \Delta R \cdot \sum_{m=1}^M |S_{Rx}[m]| e^{j \frac{2\pi}{M} md}. \quad (9)$$

$|S_{Rx}[m]|$  ist die Amplitude der  $S_{Rx}[k]$  der  $m$ -ten Frequenz. Mit Hilfe der Entfernungsauflösung  $\Delta R$  können die Abstände im Zeitbereich in eine räumliche Entfernung umgerechnet werden.

### 4.2 Bestimmung der Atemfrequenz mit FFT

Für jede Entfernung  $d$  bildet das Signal  $x_{Raum}[d]$  über alle Frames ein Signal im Zeitbereich für diese Entfernung  $x_d[n]$ . Nach einer Hochpass-Filterung, bei der das Übersprechen zwischen Sender und Empfänger und der statische Anteil eliminiert werden, kann man das Atemsignal erkennen. Im Bild 3 wird oben das gefilterte Signal, das bei einer Messung in der in Bild 6a gezeigten Szene aufgenommen wurde, für die erste Entfernungsauflösung gezeigt. In dieser Messung lag eine Testperson unter einer Holzplatte.

Das Fourier Spektrum des in Bild 3 oben dargestellten Signals ist in Bild 3 unten gezeigt. Es enthält noch einen statischen Anteil bei  $f = 0$ . Zur Detektion der Atmung

**Bild 3.** Oben: Gefiltertes Signal für den ersten Abstand  $x_1$  im Zeitbereich. Unten: Spektrum aus diesem

wird der Frequenzbereich zwischen 0,05 Hz und 1 Hz analysiert, da kein Mensch langsamer als 0,05 Hz und schneller als 1 Hz atmet. Die Frequenz mit der höchsten Amplitude in diesem Frequenzintervall ergibt die über FFT berechnete Atemfrequenz

$$f_{atm,FFT} = f(\max|FFT(x_1)|). \quad (10)$$

Bild 3 zeigt die Atemfrequenz des Probanden von 0,27 Hz an. Aus dem FFT Spektrum kann darüber hinaus das Signal-zu-Rausch-Verhältnis SNR im interessierenden Frequenzbereich 0,05 bis 1 Hz bestimmt werden.

### 4.3 Bestimmung der Atemfrequenz mit CWT

Im Fourier-Spektrum liegt die Zeitinformation in der Phase vor. Wenn sich während einer Messung die Person leicht bewegt, kann das Messsignal so gestört sein, dass das Maximum im Spektrum weit von der korrekten Atemfrequenz entfernt liegt. Zeit-Frequenz-Analyseverfahren zeigen die Variation des Spektrums über die Zeit und sind daher robuster gegenüber temporären Störungen. Aufgrund der höheren Frequenzauflösung bei niedrigen Frequenzen ist eine kontinuierliche Wavelet-Transformation (CWT) einer Kurzzeit-Fourier-Transformation überlegen.

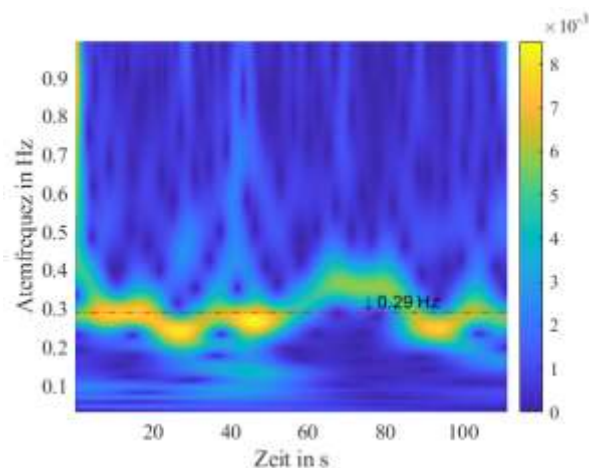
**Bild 4.** CWT des im Bild 3 oben dargestellten Bildes.



Bild 4 zeigt die Atemfrequenz aus einer Messung über zwei Minuten. Die Atemfrequenz schwankt leicht um den Mittelwert bei 0,29 Hz. Befindet sich der Verschütteter in Panik, schwankt die Atemfrequenz stärker.

Für jeden Zeitpunkt kann aus dem CWT-Signal die Frequenz mit der höchsten Amplitude  $f_{\max A}$  bestimmt werden. Die so berechnete Atemfrequenz ergibt den Modus der Frequenz  $f_{\max A}$

$$f_{\text{atm,CWT}} = \text{mode}(f_{\max A}). \quad (11)$$

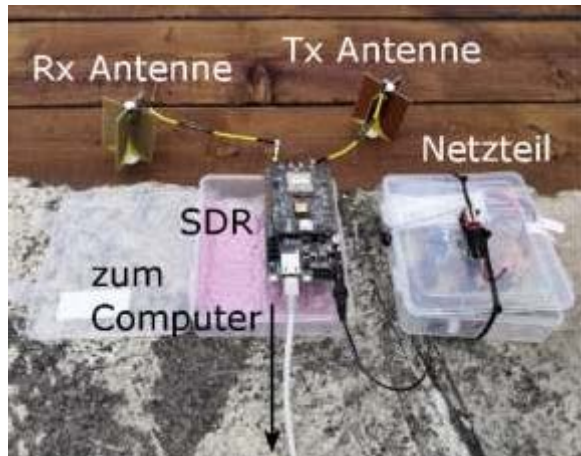
#### 4.4 Bewertung der Zuverlässigkeit der Atemerkennung

In einem Notfall benötigen die Rettungskräfte kurze und klare Informationen über eine positive Detektion. Daher müssen die Daten aus der Signalverarbeitung bewertet werden, um eine Aussage treffen zu können, ob Atmung erkannt wird oder nicht.

Die FFT und die CWT werden immer ein Maximum liefern, unabhängig davon, ob sich eine Person unter der untersuchten Oberfläche befindet. Das  $SNR$  ist eine wesentliche Kenngröße für eine wahrpositive Erkennung. Darüber hinaus kann  $f_{\text{atm,FFT}}$  und  $f_{\text{atm,CWT}}$  verglichen werden. Wir definieren den normalisierten Atemfrequenzunterschied als

$$\Delta f_{\text{atm}} = \frac{|f_{\text{atm,CWT}} - f_{\text{atm,FFT}}|}{(f_{\text{atm,CWT}} + f_{\text{atm,FFT}})/2} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Eine echte positive Atemerkennung sollte zusätzlich zu



**Bild 5.** Foto des Bioradars in einem Feldversuch. In einem hohen  $SNR$  auch ein kleines  $\Delta f_{\text{atm}}$  zeigen.

## 5 Messungen und Diskussionen

Ein erster Feldversuch wurde auf einem Übungsgelände des Technischen Hilfswerks in Wesel durchgeführt. Bei diesem Test war das Bioradar noch nicht in einem robusten Gehäuse verpackt. Zudem benötigte es zum Ablauf noch eine Steuerung über einen externen Rechner, der über Ethernet verbunden war, siehe Bild 5.



**Bild 6.** Messszenen: (a) Ein Tunnel, der mit einer Holzplatte abgedeckt ist. (b) Ein Betonrohr. (c) Ein Gebäude mit Holzböden. (d) Ein Gebäude mit Stahlbetonböden.

Bild 6 zeigt die vier ausgewählten Messszenen. Für jede Szene wurden zwei Messungen durchgeführt. In (a) und (b) lag die Testperson in einem Tunnel. Das Bioradar wurde auf dem Tunnel platziert. In (c) und (d) lag die Testperson im Erdgeschoss. Das Bioradar wurde in der ersten Etage des Gebäudes platziert.

#	Szene	$f_{\text{atm,FFT}}$ [Hz]	$f_{\text{atm,CWT}}$ [Hz]	$\Delta f_{\text{atm}}$	$SNR$ [dB]	Atemerkennung
1	(a)	0,27	0,29	7,1%	18,2	Ja
2	(a)	0,3	0,3	0%	18,6	Ja
3	(b)	0,25	0,26	0,4%	19,4	Ja
4	(b)	0,06	0,27	127%	4,4	Nein
5	(c)	0,32	0,32	0%	26,9	Ja
6	(c)	0,13	0,13	0%	21,7	Ja
7	(d)	0,15	0,64	124%	12,7	Nein
8	(d)	0,05	0,12	41,2%	12,8	Nein

**Tabelle 2.** Bewertung der Messergebnisse.

Die Auswertungen der Messungen sind in der Tabelle 2 zu sehen. Durch Holz kann das Bioradar die Atmung gut erkennen. Die vier Messungen bei Szene (a) und (c) zeigen sowohl ein hohes  $SNR$  als auch ein niedriges  $\Delta f_{\text{atm}}$ . Auch Beton kann die elektromagnetischen Wellen durchdringen werden. Allerdings hat das Betonrohr in (b) eine gebogene Oberfläche, wodurch sich ein Luftspalt zwischen Antenne und Betonoberfläche ergibt. Dadurch ergibt sich ein schlechtes  $SNR$  und folglich hat der Bewertungsalgorithmus in der Messung 3 die Person detektiert, in der Messung 4 jedoch nicht. Stahlbeton ist mit einem Metallgitter belegt, das elektromagnetische Wellen abschirmt. Die Messungen bei der Szene (d) zeigen folglich sowohl ein niedriges  $SNR$  als auch ein großes  $\Delta f_{\text{atm}}$ . Bei diesen acht Messungen ist  $\Delta f_{\text{atm}}$  eine ebenso gut e Bewertungsgröße für die Erkennung wie das  $SNR$ .

## 6 Fazit

In diesem Beitrag wurde die Implementierung eines kleinen Bioradars mit geringer Masse und die zugehörige Signalverarbeitungsmethode vorgestellt. Feldversuchen zeigen, dass das Bioradar die menschliche Atmung durch unterschiedliche nicht-metallische Materialien hindurch erkennen kann.

Diese Forschung ist Teil des Forschungsprojekts SORTIE und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N15189 unterstützt.

## 7 Literatur

- [1] M. Loschonsky, C. H. Feige, O. Rogall, S. Fisun, and L. M. Reindl, "Detection technology for trapped and buried people," *IEEE MTT-S Int. Microw. Work. Ser. Wirel. Sensing, Local Position. RFID, Proceedings, IMWS 2009 - Croat.*, pp. 2–7, 2009.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. McGraw-Hill Higher Education, 2001.
- [3] S. Fleming *et al.*, "Normal ranges of heart rate and respiratory rate in children from birth to 18 years of age: A systematic review of observational studies," *Lancet*, vol. 377, no. 9770, pp. 1011–1018, 2011.
- [4] M. W. Semler *et al.*, "Flash mob research: A single-day, multicenter, resident-directed study of respiratory rate," *Chest*, vol. 143, no. 6, pp. 1740–1744, 2013.
- [5] D. J. Daniels, Ed., *Ground Penetrating Radar*. Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [6] C. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2016.
- [7] D. Shi, T. Aftab, G. Gidion, F. Sayed, and L. M. Reindl, "A novel electrically small ground-penetrating radar patch antenna with a parasitic ring for respiration detection," *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 1930, 2021.
- [8] T. F. Collins, R. Getz, D. Pu, and A. M. Wyglinski, *Software-Defined Radio for Engineers*. Artech House, 2018.
- [9] Analog Devices, "AD936x Family Transceiver." <https://www.analog.com/en/applications/technology/sdr-radioverse-pavilion-home/wideband-transceivers.html>. [Accessed: 05-Sep-2021].