

生体を伝送路とした超音波通信の 精度向上に関する研究

鈴木 真ノ介^{*1}, 高野 一輝^{*2}

Study on Accuracy Improvement of the Ultrasonic Wave Communication through the Human Body

Shin-nosuke SUZUKI, Kazuki TAKANO

Our research team has proposed the novel communication method for purpose of application to wearable devices. This communication uses the human body as a transmission path and two kinds of energy, electric field and ultrasonic waves are applied hybridly. Therefore, we call this method hybrid communication. To adopt the feature of those energies, this system can realize high usability and secure communication. In this study, I have particularly worked on the improvement of the accuracy on the ultrasonic wave communication. I have improved transmission error rate by changing the modulation method from the amplitude shift keying to the phase shift keying. In addition, I have developed the synchronization method suitable for the ultrasonic wave communication.

KEYWORDS : Hybrid Communication, Ultrasonic Wave, Phase Shift Keying, Communication accuracy

1. はじめに

近年, スマートフォンに代表される様々な機能を有する携帯型端末が広く普及している. その一部は更に小型化が進み, 腕時計のように装着できるものも登場し始めている. それらはウェアラブルデバイス(WD)と呼ばれ, 当研究室では WD への適用を目的とした新たな通信方式として, 生体を伝送路とし, 超音波と電界を併用したハイブリッド通信方式¹⁾を提案している. 本方式は, 2 種類のエネルギーを一つのデバイスで扱うことで, 超音波による高セキュリティな通信と電界による高速通信の両立を目指している. 本研究では, ハイブリッド通信における超音波通信に焦点を当てている. これまでの研究成果としては, 5cm 以内

の直線的な経路にて通信に成功している. しかし, 回路構成が容易なことから振幅偏移変調方式 (Amplitude Shift Keying: 以下, ASK) を採用したため, 生体を介した場合のエラーレートが 10~15%程度と高く通信精度に課題が残った.

そこで, 本研究では実機における超音波通信の精度向上を目的とし, 変調方式の検討を行った. 前述の ASK と, ノイズ耐性の高い位相偏移変調方式 (Phase Shift Keying: 以下, PSK) をともに扱うことのできる試作機を製作し, 両方式についてエラーレートの比較実験を行った. 実験により, 実機における超音波通信の変調方式を ASK から PSK へ変更することで, 通信の精度が向上した. また, 超音波通信への適用が可能な送受信回路間の同期手法を考案し, 試作機を用いた実験により有用性を確認した.

*1 電気電子創造工学科(Dept. of Innovative Electrical and Electronic Engineering), E-mail: shin-s@oyama-ct.ac.jp

*2 専攻科複合工学専攻 (Advanced Course) ※2013年度修了

2. システム構成

図1に生体を伝送路としたハイブリッド通信シ

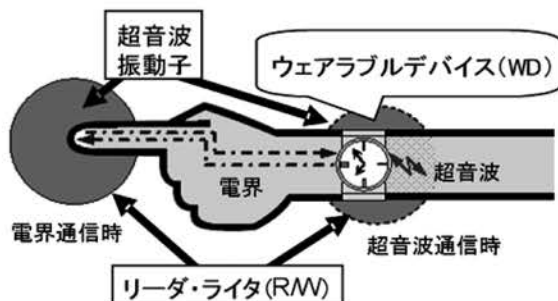


図1 ハイブリッド通信システムの概要

ステムの概要を示す。本システムは、信号の送受信に超音波振動子であるチタン酸ジルコン酸鉛系磁器 ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$: 以下, PZT) を用いている。PZTは、入力信号の波形によって超音波と電界を別々にもしくは同時に出力することが可能である。

PZTを共振周波数で駆動することで、超音波を扱うことができる。超音波は生体内の一部を直線的に伝搬する。また、指向性が鋭く空中での減衰が大きいので、WDからの情報漏洩を防ぐことができ、高セキュリティな通信を実現できる。共振周波数以外の周波数でPZTを駆動させた場合には電界を扱うことができる。電界通信は生体を覆うように存在する電界を利用して行われる²⁾。本通信は超音波に比べ高速な通信を実現可能である。

3. 超音波通信回路の製作

これまで、当研究室では実機における超音波通信の変調方式として、回路構成や復調の容易さからASKを採用していた。しかし、ASK変調波は不連続波形のため、音響信号である超音波を扱う場合に残響の影響を受けやすいという欠点を持つ。このような欠点を解消するため、本研究では位相の変化によって変調を行うPSKを導入した。PSK変調波は連続波形のため、残響やノイズへの耐性が優れている。超音波通信の変調方式としてPSKを採用した場合、ASKに比べて通信精度が高くなることが、計測器制御用ソフトウェアLabVIEW(National Instruments)を用いた実験によって確認されている³⁾。今回は、実機における超音波通信について、変調方式をASKからPSKへ変更することによる通信精度への影響を

確認するため、ASKとPSKの両方式をともに扱うことのできる超音波通信回路の製作を行った。PSKは位相の変化量により様々な方式があるが、本研究では位相の変化量が $\pi[\text{rad}]$ 毎である二値位相偏移変調方式(BPSK)を採用した。BPSKは、PSKのなかでも少ない部品での実現が可能であり、ノイズ耐性が最も高いという特徴を持つ。

まず、超音波通信回路として、図2の回路を考案した。本回路は、送信部に変調器を、受信部に復調器をそれぞれ有しており、本回路を二つ用いることで相互通信が可能となる。また、送信部のアナログスイッチ1により、ASKとPSKのどちらの方式を扱うかを選択できる。PSKを扱う場合を例とし、通信の概要を以下に記す。

送信部では、マイコンから送られる制御信号を基に発振回路で搬送波を生成する。その搬送波と反転増幅器を通して位相が反転した逆相搬送波を、アナログスイッチ2に入力する。送信データの値に従ってアナログスイッチ2が切り替わり、結果として変調波が生成され、PZTから超音波として出力される。受信部では、同期検波方式にて復調を行う。はじめに、PZTからの受信波形をアンプによって増幅する。次に、発振回路から搬送波と等しい周波数を持つ同相正弦波(以下、同期正弦波)を出力し、増幅した受信波形と掛け合わせる。最後に、乗算波形をローパスフィルタ(LPF)、およびコンパレータに通すことで、元のデータを得ることができる。

図2の設計案を基に製作した試作機を図3に示す。試作機の簡単化のため、マイコンボードArduino Uno R2とブレッドボード等を用いて、図2における送信部と受信部をそれぞれ個別の回路で実現した。また、受信回路での復調に必要な同期正弦波は、信号の同期過程を省略するため、送信回路の搬送波をそのまま用いた。PZTは直径20mm、固有共振周波数が約1.1MHzのものを二つ使用した。

4. エラーレート測定実験

製作した試作機を用いて、各変調方式についてエラーレート測定実験を行った。通信部位は人差し指上下間(約1cm)および手首上下間(約3cm)の2箇所とした。生体とPZTの間には、接触媒質としてシリコンボンド製の自作シート(約1mm)を挿入した。シリコンボンドは生体との密着性が高く、安価で加工性が良い。また、生体に

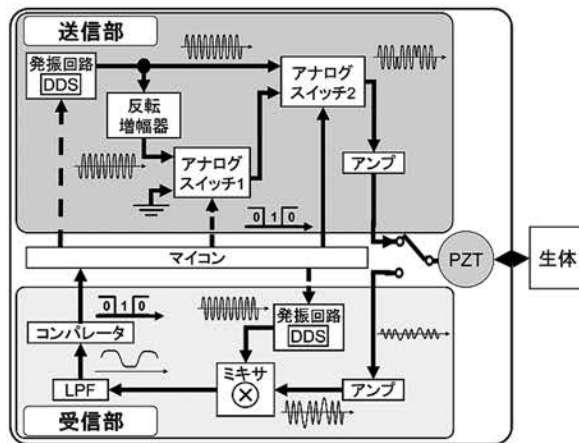


図2 超音波通信回路の概要

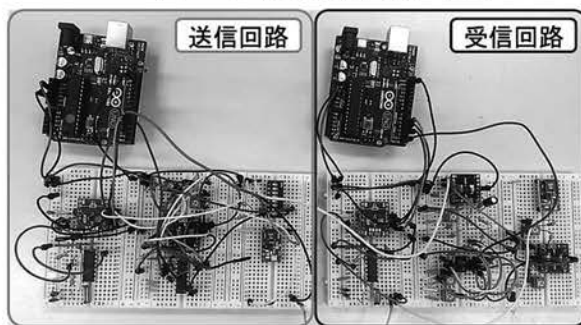


図3 試作機

近い固有音響インピーダンスを持つため、擬似生体としても用いられる。

測定方法として、まず 8 ビットの数値データ「 $(0)_{10}=(00000000)_2$ 」～「 $(255)_{10}=(11111111)_2$ 」を連続で通信し、合計 9999 個の受信データを得る。得られた受信データと送信データの比較を行い、全ビット中のエラービットの割合を示すビットエラーレート(BER)および全データ中のエラーデータの割合を示すデータエラーレート(DER)を算出した。ここでのエラーデータとは、データを構成する 8 ビット中に一つ以上のエラービットが存在するデータをいう。なお、実験における通信速度は、Arduino Uno R2 のシリアル通信機能の限界である、115.2kbps とした。

測定実験の結果を表 1 および表 2 に示す。また、通信結果の一例として、手首上下間を伝送路とし数値データ「 $(101)_{10}=(01100101)_2$ 」を送受信した場合の波形を、ASK と PSK の両方式について図 4 に示す。表より、通信部位によらず、ASK に比べ PSK のエラーレートが低くなっていることがわかる。さらに、PSK のエラーレートは ASK のエラーレートの 10 分の 1 以下に抑えられており、変調方式の変更による超音波通信の精度向上は微小なものではなく、大きな効果を示すことが確

認できた。図 4 の波形データからも、PSK を用いた場合により明瞭な復調データを得られていることがわかる。

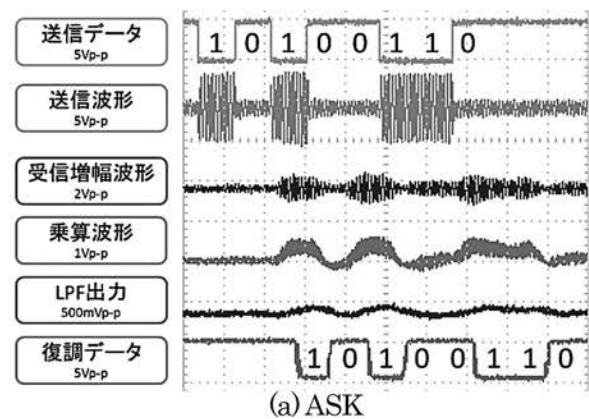
ここで、生体を伝送路とした超音波通信の使用形態として、腕時計型 WD への適用を考える。その際、通信部位が手首上下間となることが想定されるが、実験において手首上下間を通信部位とした場合には、PSK での DER が 1.10% となっている。本研究における超音波通信は、パスワードや ID 情報などの重要データを扱うことを想定して

表 1 人差し指上下間での測定結果

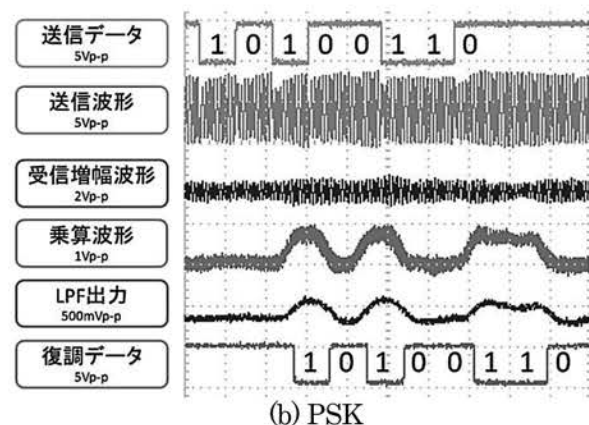
変調方式	エラーレート[%]	
	BER	DER
ASK	0.40	3.02
PSK	0.04	0.30

表 2 手首上下間での測定結果

変調方式	エラーレート[%]	
	BER	DER
ASK	2.01	14.93
PSK	0.14	1.10



(a) ASK



(b) PSK

図4 手首上下間を伝送路とした通信

いるため、更なるエラーレート低減の必要性が見受けられる。ただし、全エラービット数と全エラーデータ数の比から、各エラーデータに存在するエラービット数は8ビット中平均1.02個となる。そのため、データ中のエラービットが少数であることからエラー処理は容易であり、受信回路への簡単なエラー検出・訂正機能の付加による更なる通信精度向上が期待できる。

5. 送受信回路間の同期手法

前述のエラーレート測定実験において、受信回路での復調に必要となる同期正弦波は、回路の単純化のために送信回路の搬送波をそのまま用いた。しかし、本通信をWDへ適用し、生体のみを伝送路とした通信を実現するためには、受信回路での同期正弦波生成が必要となる。一般に、PSK復調のために同期検波方式を用いる場合、受信波形から搬送波を再生する搬送波再生法により同期正弦波を生成する⁴⁾。しかし、本通信は音響信号である超音波を用いているため、受信波形から搬送波を再生することが難しい。そのため、受信回路の内部に発振回路を設け搬送波と等しい周波数を持つ正弦波を生成し、受信信号と同期させる手法を用いる。今回は、マイコン、発振回路、アンプ、ミキサ、およびLPFといった試作機内の既存要素を用いた手法を考案した。図5に同期手法の概要図を示し、以下に同期工程を記す。

送信回路では搬送波を生成し、その搬送波を受信側へ一定時間送信し続ける。受信回路では、発振回路にて搬送波と等しい周波数を持つ正弦波を生成し、受信後増幅した搬送波と掛け合わせる。ミキサ出力の平均値は受信回路で生成した正弦波と受信した搬送波の位相差に対応しており、同相時に最大、逆相時に最小となる。次に、ミキサ出力をLPFに通すことで交流成分を除去する。最後にマイコンのアナログピンで直流電圧値を読み取り事前に設定した閾値と比較することで、送受信回路が互いに同期しているか否かの判定を行う。判定結果が非同期の場合には、発振回路を制御し正弦波の位相を一定角度変更する。判定結果が同期となるまで位相変更を繰り返すことで、同期正弦波を得ることができる。

試作機に本手法を適用し、通信実験を行った。通信部位はシリコンボンド製の擬似生体（約3cm）とした。また、非同期時の位相変更は $\pi/32[\text{rad}]$ 毎とし、同期判定の許容誤差を進み方向、遅れ方向ともに $\pi/64[\text{rad}]$ までとしている。

実験方法として、まず送信回路および受信回路

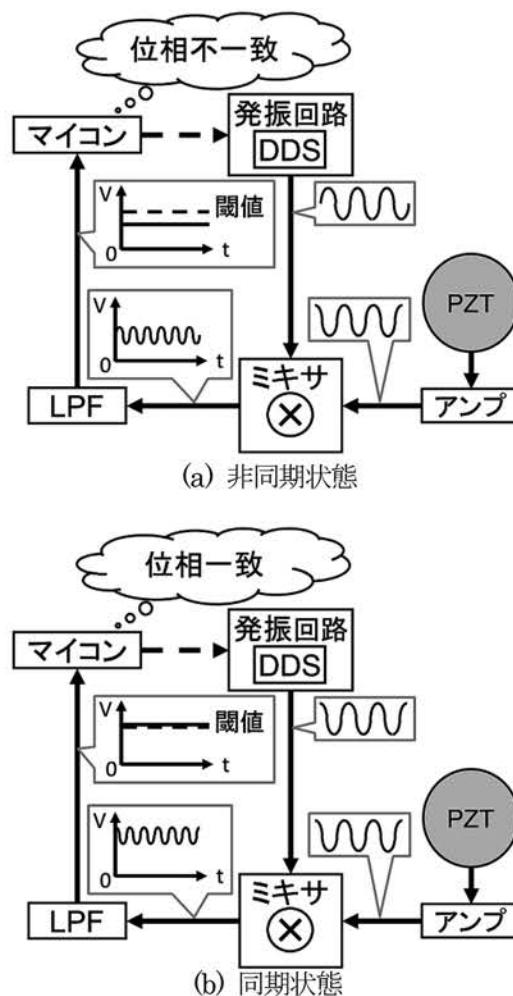


図5 同期手法の概要

それぞれにおいて、互いに異なるタイミングで正弦波を生成する。次に受信回路での同期を行い、その直後に前述したエラーレート測定実験と同様の通信を行う。これを10回繰り返すことで、同期精度を観測した。なお、実験結果を明瞭にするため、送受信回路間が完全に同期した場合にエラーレートが0[%]となるよう回路を調整した。

実験結果を表3に示す。表より、本手法による送受信回路間の同期が可能であり、また本手法の適用は通信精度をほぼ低下させないことがわかる。以上より、本手法の有用性を確認できた。また、今回は非同期時の位相変更を $\pi/32[\text{rad}]$ 毎とした

表3 同期実験結果

回数	エラーレート[%]	
	BER	DER
1,2 回目	0	0
3 回目	0.006250	0.050005
4~10 回目	0	0
平均	0.000625	0.005001

が、一度の変更角度を小さくすることで、更なる同期精度の向上が可能である。

6. まとめと今後の課題

生体を伝送路とした超音波通信の精度向上のため、ASK と PSK の 2 種類の変調方式を扱える超音波通信回路を考案し、設計案に基づく試作機の製作を行った。製作した試作機を用いた変調方式の比較実験により、実機における超音波通信の変調方式を ASK から PSK へ変更することで、通信の精度向上に成功した。また、超音波通信への適用が可能な回路間の同期手法を考案し、実験により手法の有用性を確認した。

今後の課題としては、更なる通信精度向上のためのエラー処理機能や、個人差に対応するための出力調整機構の導入、WD への搭載を想定した小型回路の設計・製作などがあげられる。

参考文献

- 1) S. Suzuki, et al. : "Hybrid Communication System using Ultrasonic Waves and Electric Field thorough the Human Body" , Proc. of USE2010, 1Pb-28, pp. 197-198(2010)
- 2) 前山 利幸：「人体通信の概要・最新技術の開発・応用動向及び今後の展望」，日本技術情報センター，(2009)
- 3) S. Suzuki, et al., "Comparison of the Transmission Accuracy by the Modulation Method on the Ultrasonic Waves Communication through a Human Body", Proc. of USE2012, 3Pb3-1, pp.449-450 (2012)
- 4) 関 清三：「わかりやすいディジタル変復調の基礎」，オーム社，(2001)

【受理年月日 2014年 9月2日】

