

# 聞こえる AM 変調実験セットの開発 ~ 体感型教材を目指して ~

Developping tangible experimental toolkit for amplitude modulation

福井 綺花<sup>†</sup> 乾 聡志<sup>†</sup> 高橋 徹<sup>†</sup>

Ayaka Fukui Satoshi Inui Toru Takahashi

## 1. はじめに

近年 IT 技術者不足が問題になっている。背景には社会の IoT 化, クラウドサービスの普及, 教育現場での ICT 利用促進, 自動運転技術の進展など, 新技術の普及や情報技術の利用, 情報の取り扱い方の変化スピードに人材育成と人材供給が間に合っていないことが一つの要因になっていると考えられる。

根本原因として人口減少があるものの IT 技術職に対するイメージの低下や IT 関連技術の修得が困難である問題も抱えている。大学や専門学校に進学する以前に IT 技術を理解することが難しいイメージが定着し, 早い段階で進学や就職の選択肢から外されているのではないかと推測される。

このような状況を打開するための一つの方法として, IT 関連技術の修得を支援する教材開発が必要と考えた。本稿では学際的な立場から IT 関連技術の修得を支援する方法について考え, 体感型の支援教材を提案する。

IT 技術の修得は, 多くの抽象的な事柄を具体化し理解を進める必要がある。見えない事, 触れられない物を理解しなければならぬところに習得の困難さがあると考えられる。抽象的な事柄を理解するための支援教材を体感可能な形で提供し, 直感的な理解を促す事ができれば, 初学者の修得を支援できるのではないかと考えた。

本研究では IT 技術の一つである無線通信を題材に習得支援教材を開発する。無線信号は不可視であり信号を直観的に理解することは困難である。本来高周波帯域で電波として扱う信号を低周波帯域で表現し, 音波として扱う方法で体感できる (つまり聞こえる) 通信教材を提供する。

通信プロセスを可聴域で表現することで, 基本的な仕組みを聴くという形で体感できる。体感による楽しい学習時間を提供できれば, 容易に IT 技術の基礎を修得させることも可能となり, IT 技術者志望も増加すると考えている。

## 2. 体感型の無線通信教育教材

通信全体を体感可能な形で教材を設計する。無線通信における通信波形を可聴周波数帯で表現し, 聞こえる通信として教材化する。更に, 無線通信の論理的通信路を

見える物理的な通信路で置き換える。本報告では, AM 通信を体感化する例を示す。具体的な通信路に糸電話を用いる例を紹介する。この方法により, 物理的な通信路は可視化され, かつ, 通信路に触れることも可能となる。この体感化は, 特定の通信方式に依存しない考え方であり, FM 通信や PM 通信も同様に教材化可能である。

本教材は, 信号処理の専門教育を受ける前の人々に対して使用することを想定している。教材の利用を通じて IT 技術を学ぶ動機付けに繋ぐことを期待している。教材は, 年齢や知識に依存せず, 幅広い授業のシナリオに対応できるよう考慮する。受講対象の生徒の学習レベルに応じて多彩な学習シナリオに適応可能な教材が望ましい。例えば, 低学年向けには, 教材そのものを工作しながら楽しく学べることも必要である。ここでは通信インフラ部に糸電話を用いているため, 糸電話の作成自体を楽しませることが可能である。中高生にとっては, 工作そのものは不要で, 通信路の物理媒体としての紙コップ部をビニールパイプで作った伝声管で置き換えてたシナリオを作成してもよい。他の通信媒体と比較することに学習の重点を置くことも可能である。

本教材により取扱可能な学習範囲は, シナリオ設計に強く依存する。例えば, 最も基本的な部分として, 音や電波が時間信号として振動であることを体感的に学習できる。通信としては, 紙コップの大きさや, 糸の材質を変えることで, 通信路の通信帯域や減衰特性などが変化することを学習可能である。信号の劣化を音として聞き分けることが可能であり理解を助けられる。信号の減衰が通信エラーの一因になることを伝えた上で, 糸電話の改良を行う学習シナリオも作成可能である。低学年ほど, 楽しさに重点をおいたシナリオを作成し, 高学年ほど, 技術の基本的な性質を体感できるシナリオを用意し幅広い学年に対応する。

## 3. 実験教材

糸電話を使った AM 通信の実験教材について述べる。紙コップとタコ糸を利用し, 1, 2, 3, 4, 5 (m) の長さの糸電話を作成する。糸電話を介してマイクとスピーカを設置し, 音声を再生・録音する。スピーカ側の紙コップが送信器, マイク側の紙コップが受信器に相当する。糸電話が通信路を表している。教材の構成を図 1 に示す。

通常の AM 通信は, 中波帯域 (波長 100 ~ 1000m 程度)

<sup>†</sup> 大阪産業大学, Osaka Sangyo University

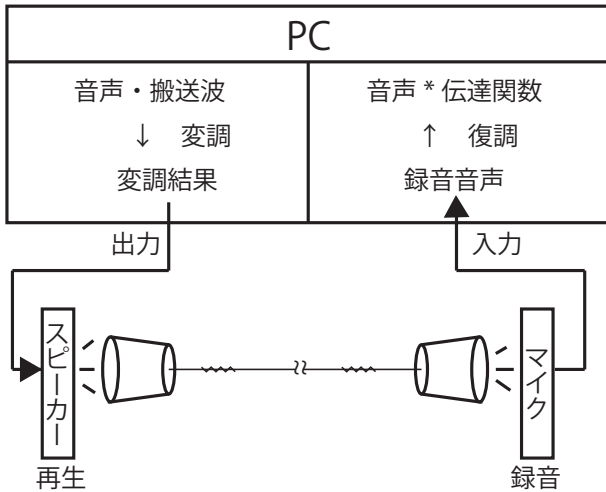


図 1: 実験構成図

で使用されている。また、複数のチャンネルが同時使用されることが前提であるため、キャリア周波数も中波帯域の周波数を離散的に用いるのが一般である。音楽の伝送に耐える帯域が確保されている。

本教材では、通信に用いる帯域自体が可聴帯域であるため、十分な周波数帯域を確保できない。通信の仕組みを伝えることが前提であることから、複数チャンネルの同時使用を前提とせず、1つのキャリアで伝える方法に特化しキャリア周波数と送信音声を作成する。また、送信する信号も音楽信号よりも狭い帯域で表現可能な音声を用いる。

### 3.1 変調

AM 変調によって信号  $s(n)$  を変調する。  $n$  は離散時間を表すインデックスである。この時、搬送波を  $f(n)$  とすると、変調信号  $y(n)$  は、

$$y(n) = A(1 + ms(n))f(n) \quad (1)$$

である [1, 2]。  $m$  を変調度と呼び  $m = A_c/A$  である。搬送波の周波数を  $f_c$  (Hz) とすると  $f(n)$  は、

$$f(n) = A_c \cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_s}\right) \quad (2)$$

である。ただし、サンプリング周波数を  $f_s$  とする。

### 3.2 復調

同期検波を用いて復調する。非同期検波に比べて、高精度に信号を復調できる。

受信波形を  $\hat{y}(n)$  とし、同期検波波形を  $p(n)$  とすると、

$$p(n) = \hat{y}(n) * f'(n) \quad (3)$$

と表せる [1]。送信側の搬送波と同一周波数  $f_c$  (Hz) に

基づき生成する  $f'(n)$  で

$$f'(n) = \cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_s} + \phi_c\right) \quad (4)$$

と表される。送信側の搬送波と位相を完全に一致させることは困難であることから位相差  $\phi_c$  が導入されている。  $p(n)$  をローパスフィルタで不要な成分を除去し、時間平均値を 0 に正規化することで復調信号  $\hat{s}(n)$  を得る。

ここでは、ローパスフィルタ (LPF: Low Pass Filter) を FIR (Finite Impulse Response) フィルタで設計する。92 次の線形位相フィルタを用い、カットオフ周波数 4000 Hz の LPF を設計する [3]。図 2, 3 に LPF の時間波形と振幅周波数特性を示す。

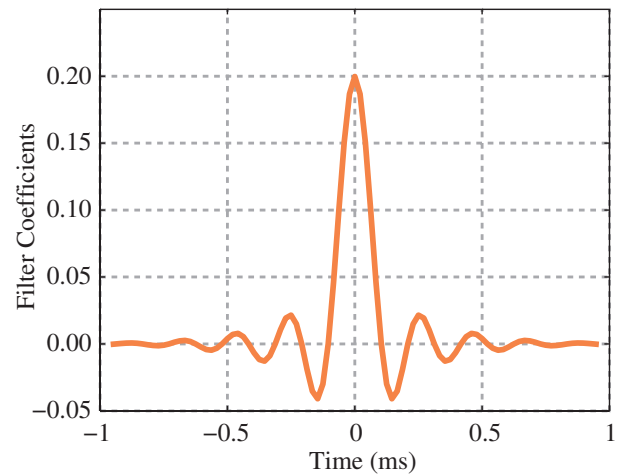


図 2: 92 次 FIR フィルタの時間波形

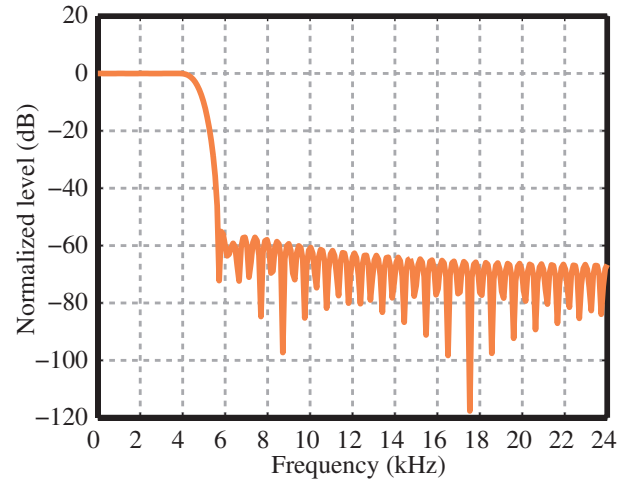


図 3: 92 次 FIR フィルタの振幅周波数特性

設計した FIR フィルタの係数を  $b(0), b(1), \dots, b(92)$  とすると、復調波形  $\hat{s}(n)$  は、

$$\hat{s}(n) = \sum_{m=0}^{92} b(m)p(n-m) \quad (5)$$

である.  $n = 0, \dots, N - 1$  であり,  $N$  は受信信号のサンプル数である.

### 3.3 AM 信号の可聴化

$s(n)$  が  $b$  (Hz) に帯域制限された信号の時, 搬送波の周波数は,  $b$  より十分大きい必要がある. また, システム全体をデジタル信号処理系で表すことからサンプリング周波数  $f_s$  の下で  $f_c$  はナイキスト周波数未満である必要がある.

$$b \ll f_c < f_s/2 \quad (6)$$

変調後の波形には  $f_c - b$  から  $f_c + b$  の周波数成分を含む. 従って

$$0 < f_c - b, \quad (7)$$

$$f_c + b < f_s/2 \quad (8)$$

も満たす必要がある.

以上の条件を満たす可聴帯域 AM 信号の搬送波の周波数を設計する. 一般的な PC で録音と再生がサポートされている 48000 Hz をサンプリング周波数に設計する. つまり,  $f_s = 48000$  とする.  $f_c < f_s/2 = 24000$  から,  $f_c = 10000$  とする. 次に,  $b \ll f_c$  を  $2.5b \leq f$  と考え,  $b = 4000$  とする. これは,  $0 < f_c - b = 10000 - 4000 = 6000$  および  $f_c + b (= 10000 + 4000 = 14000) < f_s/2 (= 48000/2 = 24000)$  を満たす. 搬送波の周波数が高いほど, 送信信号の帯域  $b$  を広く設定可能である. 送信帯域は増加するが, 搬送波が可聴域を越える信号となり体感不可能となる. 健全な成人の可聴領域の上限 (18000Hz 程度) 以下となるよう 10000 Hz で設計する. これらの条件から送信信号の帯域  $b$  は 4000 Hz となった. この条件下では, 4000 Hz の低域通過フィルタを通した音声信号を伝送する実験が可能である. 日本語音声の母音の第 1, 第 2 ホルマントは, 4000 Hz 以下で表現可能であることから, 少なくとも母音の明瞭度を保った伝送品質を満たした通信路を設計できる.

### 3.4 変復調の確認

表 1 の条件で, 4000 Hz 以下の成分のみから構成される音声信号を可聴帯域 AM 通信で伝送する. 図 4 に, 音声信号の波形を示す. この信号は, 音声コーパス JNAS [4] の女性話者による音素バランス文である. コーパスには, サンプリング周波数 16kHz の波形が記録されているため, 一度 8kHz にダウンサンプリングした波形を 48kHz にアップサンプリングしている. 図 5 に図 4 のスペクトログラムを示す. 主要エネルギーが 4000 Hz 以下に集まった信号であることを確認できる.

図 4 を変調すると, 図 6 が得られる. 変調後のスペクトログラムを図 7 に示す. 搬送波を 10000 Hz にしたため, エネルギーの中心は 10000 Hz に表れている. また,

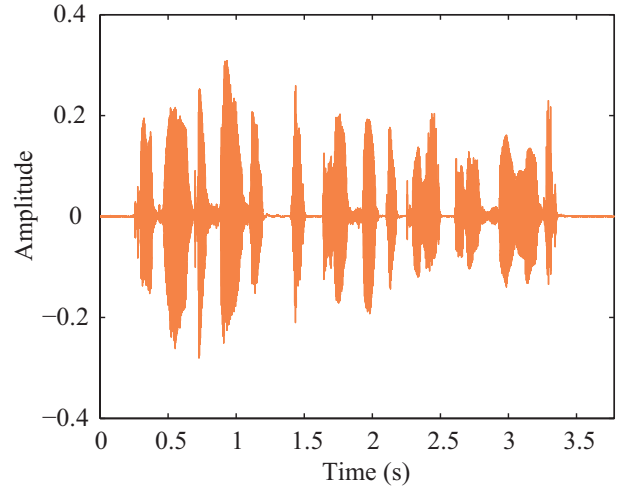


図 4: Speech Source  $s(n)$

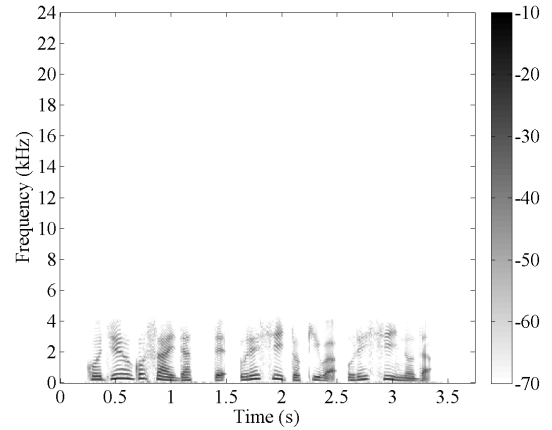


図 5: Spectrogram of Speech Source

送信波形が 0 ~ 4000 Hz の帯域の信号であることから, 10000 Hz を中心に上下 4000 Hz の幅 (8000 ~ 14000 Hz の帯域) で変調信号のエネルギーが分布していることも確認できる.

図 6 の変調信号を同期検波した信号を図 8 に示す. 更に LPF 処理後の復調信号を図 9 に示す. 図 4 と比較すると, サンプルレベルで一致しないが, 概形は保存されている. この例の SNR

$$10 \log_{10} \frac{\sum_n s^2(n)}{\sum_n (s(n) - \hat{s}(n))^2} \quad (9)$$

は, 15.7 (dB) であった.  $b \ll f_c$  を  $2.5b \leq f$  と近似しても 15 (dB) 程度の SNR を実現可能であることを確認できた.  $b=400$  にすると, 近似は  $25b \leq f$  となり  $b \ll f < f_c$  条件に近づくが, 転送できる音の帯域が 400 Hz に狭まり, 信号処理の過程の各段階を試聴可能であっても, 音声の明瞭度が著しく低下する.  $b$  の微調整は可能であるが, 聞こえる教材として  $b = 4000$  程度が適当

である。

#### 4. 糸電話を用いた AM 通信実験教材

前章では、AM 通信により音声信号を可聴帯域で変調する設計を示し、15 (dB) 程度の SNR で音声を伝送可能なことを示した。本章では、前章で設計した可聴帯域 AM 通信を用いた糸電話を通じた AM 通信教材の伝達特性を確認し、糸電話を通信媒体とした可聴帯域 AM 通信を実現可能なことを示す。

##### 4.1 方法

タコ糸と紙コップを使用し、タコ糸の長さが 1, 2, 3, 4, 5 (m) の 5 種類の糸電話を作成する。作成した糸電話をマイク (システムインフロンティア製くらげくん)・スピーカー (Genelec 8020A) 間に置く。マイクは全部で 8ch あるため、1ch のマイク上に糸電話の紙コップ部分を当てる。AD/DA 変換器 (システムインフロンティア製 RASP24) を通して同期収録する。今回は、1 台の PC で送信と受信を兼用する。

##### 4.2 糸電話の伝達特性

TSP (Time Stretched Pulse) 信号 (高周波から低周波にスイープする信号) [5] を用い、1, 2, 3, 4, 5 (m) の糸長を持つ糸電話の伝達特性を計測する。計測状況を図 10 に示す。スピーカーとマイクロホンの間に糸電話を置き伝達特性を測定する。この時、スピーカからマイクロホンまでの糸電話を経由せずに伝達する成分と、糸電話を経由して伝達する成分が混合される。この特性を  $h_1(n)$  とする。

糸電話を設置しない場合のスピーカからマイクロホンまでの伝達特性を予め計測しこれを  $h_0(n)$  と置くと、糸電話を経由して伝達される成分のみの伝達特性  $h(n)$  を

$$h(n) = \frac{h_1(n)}{h_0(n)} \quad (10)$$

と推定できる。糸長 1m の時の  $h_1(n)$  と  $h_0(n)$  周波数振幅特性を図 11 に示す。2, 3, 4, 5 (m) で周波数振幅特性も 1 (m) と同様の傾向があり糸長による違いは見られ

表 1: Configuration

サンプリング周波数	48000 (Hz)
搬送波周波数	10000 (Hz)
$A$	1.0
$A_c$	0.5
LPF の FIR 次数	92
入力信号 (被変調波)	音声 (~ 4000Hz)
出力信号 (復調波形)	音声

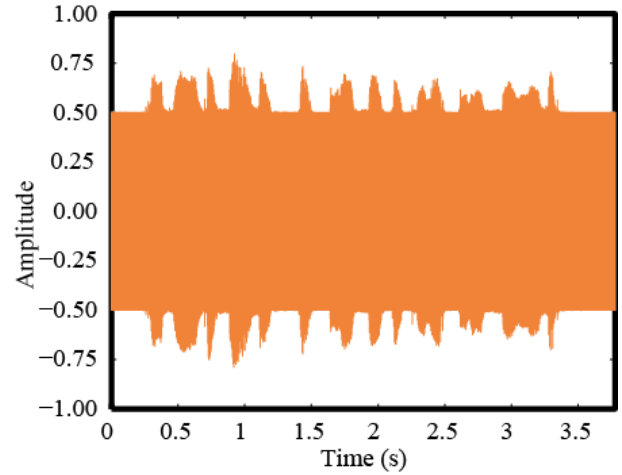


図 6: Amplitude Modulated Speech Signal  $y(n)$

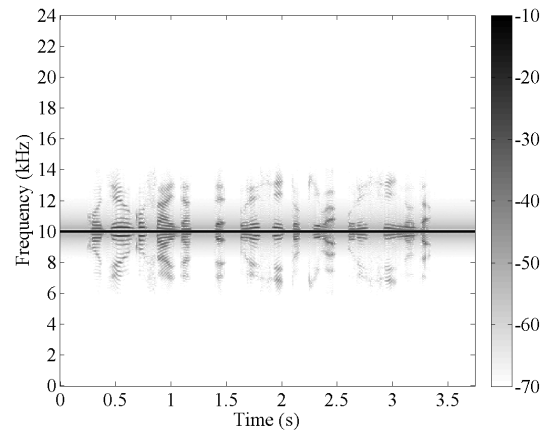


図 7: Spectrogram of Amplitude Modulated Speech Signal

なかった。これは、糸中の音波の伝搬速度が空気中よりも速いため、距離の変化に対して伝達関数の変化が微小であるためと推測される。糸電話の伝達特性は 1~5 m の範囲で糸の長さに依存しないことから、糸の長さをこの範囲で自由に決定できる。教材のシナリオ中に糸電話の工作を取り入れても厳密に糸長を扱う必要がなく簡単に導入できる。

$h(n)$  を伝達特性とし、糸電話を経由して AM 信号を受信する場合を考える。AM 信号  $y(n)$  と  $h(n)$  を畳み込み、伝送信号をシミュレーション合成する。合成した信号を AM 信号を復調し得られる信号の SNR は、9 (dB) であった。伝達特性の影響を受けて SNR が 6 (dB) 低下しているが、明両度の極端な低下はなく、発話内容を聞き取ることが可能である。従って糸電話を用いた可聴 AM 通信教材を実現できることが確認できた。

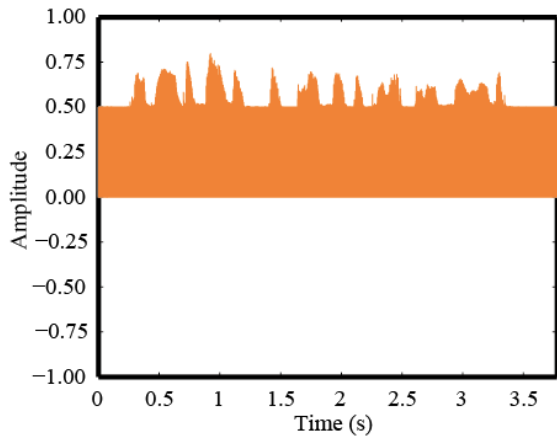


図 8: Synchronous Detected Signal  $p(n)$

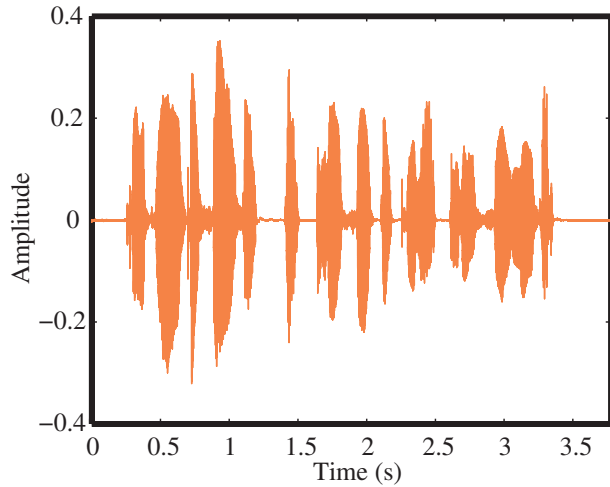


図 9: AM demodulated Signal  $\hat{s}(n)$

## 5. まとめ

本研究では IT 技術の 1 つである AM 通信を題材とした教材を開発した。本来高周波帯域で電波として扱う AM 通信の変調復調過程で生成される各信号を可聴帯域で表現可能な変調信号の構成方法を示した。つまり、聴くことのできる AM 通信を実現した。本手法は、糸電話という可視な通信路を用い、経路が視覚的に確認できる特徴を持つ。

提案した教材による信号伝達の基本性能は、SNR で 15 (dB) 程度を実現している。また、糸電話を通じた伝達においても、9 (dB) を達成しており、送信音声を明瞭に聞き取ることが可能である。今後本教材を用いた教育シナリオを作成し、教育効果について検討する必要がある。また、AM 通信以外の FM 通信や PSK 通信など教材の拡充も進めたいと考えている。

## 参考文献

[1] 平松, “通信方式,” コロナ社, 1985.

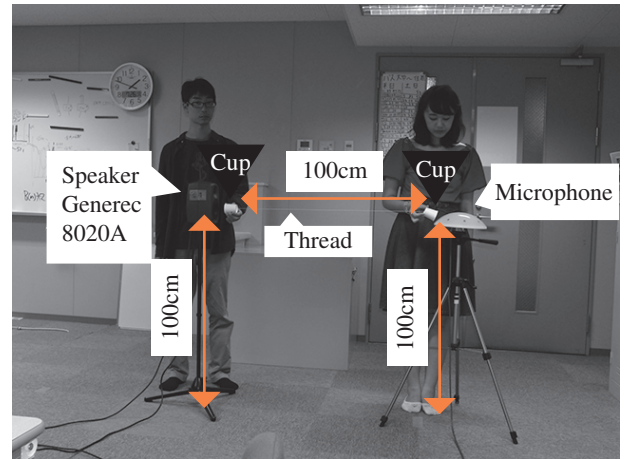


図 10: Measuring Impulse Response for telephone made from two paper cups and a piece of string

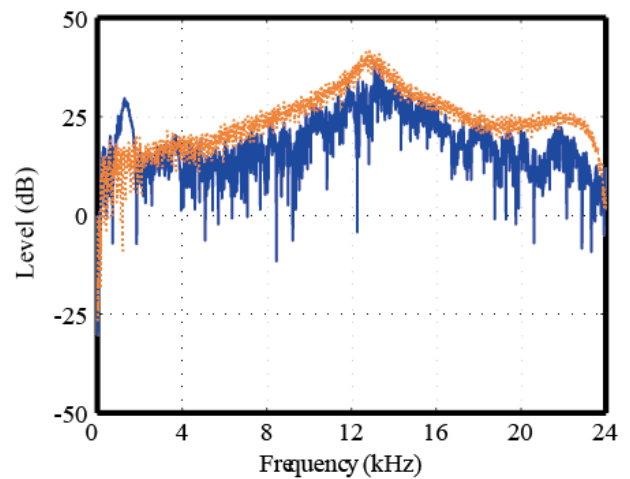


図 11: Impulse Response for telephone made from two paper cups and a piece of string (Solid line: with telephone, Dotted line: without telephone)

- [2] 斉藤, “デジタル無線通信の変復調,” 電子情報通信学会, 1996.
- [3] “Programs for Digital Signal Processing,” IEEE Press, New York, 1979.
- [4] 伊藤, 他, “JNAS: Japanese speech corpus for large vocabulary continuous speech recognition research,” ASJ(E), 20(3), pp.199–206, 1999.
- [5] Aoshima, “JComputer-generated pulse signal applied for sound measurement,” JASA, 69, p.1484, 1981.