

指導員研修のための超音波を搬送波とした AM 送受信基板の開発 Development of AM Transceiver Circuit Board using Ultrasonic Carrier Wave for the Training of Vocational Training Instructors

五十嵐 茂 (職業能力開発総合大学校)
Shigeru Igarashi

電子系の指導員研修として、超音波応用技術を習得できる研修コースを策定している。その応用技術の1つである通信応用を習得するために、超音波を搬送波とした AM 送受信基板を開発した。これは、回路設計、基板組立、波形を観察しながら調整・動作確認して、動作原理を理解し通信応用を習得できるよう考案した教材基板である。

本稿では、開発仕様とブロック図を掲げ、レベルダイヤグラムを使用した設計や考察、アナログ乗算 IC を使用した AM 変調および復調の原理、各部の動作波形、基板開発過程と工夫等と、実際に実施した指導員研修の内容と訓練効果について報告する。その結果、本教材基板は、受講生からの意見により十分な訓練効果が確認できたものと考えられる。

キーワード：超音波、AM 変調、レベルダイヤグラム、教材開発、指導員研修

1. はじめに

技能・技術実践研修、いわゆる指導員研修の電子系コースとして、これまで総合制作実習において超音波を応用した教材の開発事例^{[1][2]}を紹介しながら、超音波応用技術を習得できる研修コースを策定している。これらの開発事例は、①距離計測応用、②ドップラ応用、③通信応用の3つの原理に分類でき、その中の通信応用として、超音波を搬送波とした AM (Amplitude Modulation) 送受信基板を研修教材として開発^[3]した (以降、プリント配線板は基板とする)。これは電波の代わりに超音波を搬送波として送受信し音声等を伝えることができる。特に電波の通りにくい海中での音声通信には超音波が利用されており、水中トランシーバーも製品化^[4]されている。

今回、回路設計、基板組立、動作検証をしながら動作原理を習得でき、電池駆動で必要最小限の回路による教材開発をめざした。

市販の空中超音波センサは、周波数 40 kHz が主流で、安価で入手性がよい。電子回路の設計や組立が比較的容易で、オシロスコープでの観測もしやすい。

本稿は、開発仕様から、ブロック図による回路構成、レベルダイヤグラムによる設計、AM 変調・復調の原理、各部の動作波形、基板の開発過程と工夫、実際の指導員研修の内容と訓練効果等について報告する。

2. 開発仕様と変調原理

2.1 開発仕様とブロック図

図 1 に開発した教材基板の外観を、図 2 にブロック図を示す。また、表 1 に開発仕様を示す。

主な開発仕様として、センサは 40 kHz の空中超音波センサを使用し、持ち帰り可能な電池駆動、マイクによる音声とオーディオプレーヤからの音楽が入力でき、マグネットスピーカによる出力とした。



図 1 超音波式 AM 送受信基板の外観

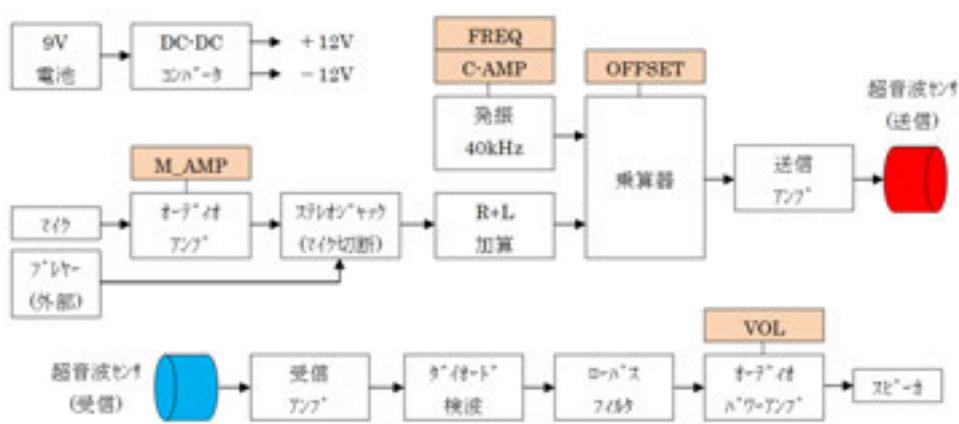


図 2 ブロック図 (色付ブロックは調整点)

表 1 開発仕様

搬送波 入力	空中超音波 40 kHz (波長 8.5 mm) コンデンサマイクの音声信号、または オーディオプレーヤの LINE 信号
変調方式 復調方式	アナログ乗算 IC による AM 変調 ダイオード検波とローパスフィルタ
出力 電源	マグネットスピーカ 8 Ω / 8 W 9 V 乾電池から ±12 V 変換

AM 変調はアナログ乗算 IC (以降、乗算 IC) を使用し、復調はダイオード検波とローパスフィルタによる構成とした。

2.2 AM 変調の原理

超音波は波動の一種なので、電波と同様に考えることができる。一般に波動の式は式(1)となる。

$$A \cos (2\pi f t + \varphi) \tag{1}$$

ここで、 A は振幅、 f は周波数、 φ は位相で、それぞれに音声等の信号波を変調すると、振幅変調 (AM)、周波数変調 (FM)、位相変調 (PM) となる。

今、搬送波の信号を、位相は省略して式(2)とし、信号波を式(3)とすると、AM 変調波は式(4)となる。

$$V_c \cdot \cos (2\pi f_c t) \tag{2}$$

$$V_m \cdot \cos (2\pi f_m t) \tag{3}$$

$$V_c \{ 1 + m \cdot \cos (2\pi f_m t) \} \cos (2\pi f_c t) \tag{4}$$

ここで、 $m = V_m / V_c \times 100 \%$ は変調度を示す。

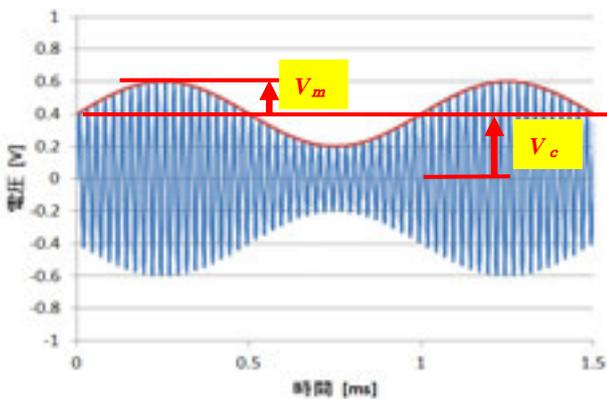


図 3 AM 変調の波形例 (変調度 50%)

図 3 は AM 変調の波形例を示す。この場合、搬送波の周波数 f_c は 40 kHz で、振幅 V_c は 0.4 V、ピーク-ピーク電圧は $0.8 V_{pp}$ である。一方、信号波の周波数 f_m は 1 kHz で、振幅 V_m は 0.2V、ピーク-ピーク電圧は $0.4 V_{pp}$ である。したがって、変調度は 50% となる。

以降、AM 変調波における信号波および搬送波の振幅電圧、ピーク-ピーク電圧は、それぞれこのように読み取ることにする。

3. 回路動作

3.1 レベルダイアグラム

超音波信号はレベル変動が大きいので、一般に信号レベルのダイナミックレンジが広がる。したがって、超音波回路の設計には、ブロック図と共にレベルダイアグラムを併用して見通しを立てることが重要となる。

図 4 に全体のレベルダイアグラムを示す。縦軸は対数目盛による電圧レベルを示し、横軸は各ブロックを通過する際の信号レベルの流れを示す。右上がりの直線は増幅を示し、右下がりの直線は減衰を示す。一般に、上限は電源電圧、下限は熱雑音等のノイズレベルとするが、今回は、変調度 100% ~ 10% の間の信号レベルを考え、超音波センサの特性や伝搬経路を含めたすべての減衰を、以降、空中伝搬による減衰とし 40 dB に設定した。これは約 300 ~ 500 mm の伝搬距離に相当する。

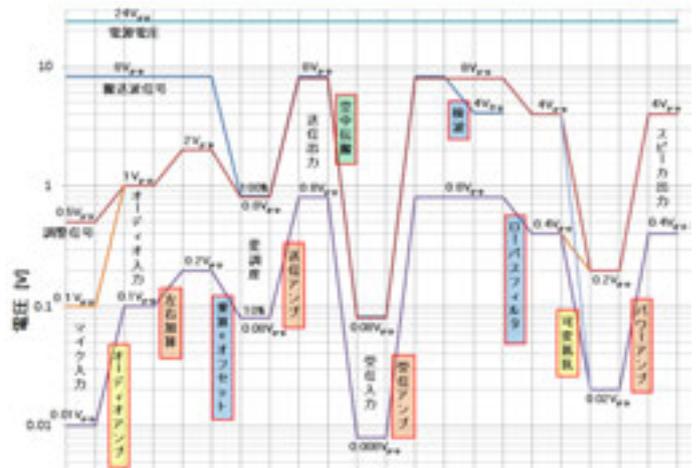


図 4 全体のレベルダイアグラム

3.2 電源部

電源は 006P 型 9 V 電池による駆動としたので持ち運びが可能となる。しかし、9 V の単電源では後述の乗算 IC が使用できないので、DC-DC コンバータによって ±12 V の両電源に変換し、乗算 IC およびオペアンプに供給した。図 4 のレベルダイアグラムでは、 $24 V_{pp}$ のラインが電源電圧レベルを示し、これ以上の信号は飽和してしまう上限を示している。

なお、電源 9 V 時の実測電流が約 130 mA となり、本基板の消費電力は約 1.2 W となった。

3.3 送信部

図 5 に送信部のレベルダイアグラムを示す。

音声や音楽の信号波のレベル範囲は、マイク入力を $0.1 \sim 0.01 V_{pp}$ とし、オーディオ入力を $1 \sim 0.1 V_{pp}$ に決めた。しかし、調整時はハウリングが起きやすいので増幅度を下げ、発振器から $0.5 V_{pp}$ の正弦波 (1 kHz) を入力することにした。したがって、オーディオアンプの増幅度は、最大 20 dB とし可変できるように設計した。

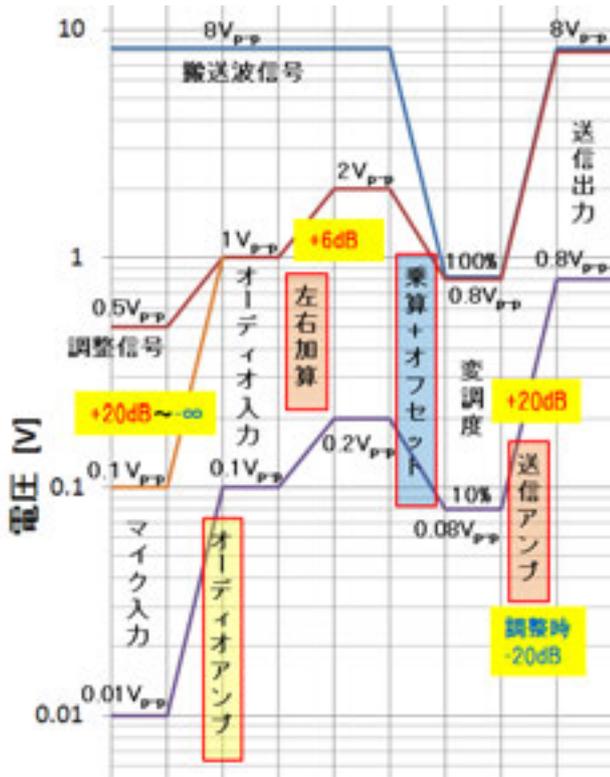


図5 送信部のレベルダイヤグラム

外部のオーディオプレーヤからの信号は、通常ステレオなので、オーディオプラグを差し込んだ時には、マイク信号を切断し左右信号を加算してモノラルにし、差し込まない時は、同じマイク信号が左右に流れて加算されるのでマイク信号は2倍になる。

搬送波はオペアンプによるウィーンブリッジ発振回路により、振幅 $8 V_{pp}$ 、周波数 40 kHz の正弦波を発振させることにした。

AM 変調を行うために、図 6 に示す乗算 IC を使用し、これにより、搬送波 $X1$ ($X2=0 \text{ V}$) と、信号波 $Y1$ とオフセット電圧 $Y2$ を加えて掛け算し、 $1/10$ された後、 $Z=0 \text{ V}$ が加算され AM 変調波が出力される。この詳細を次項に示す。

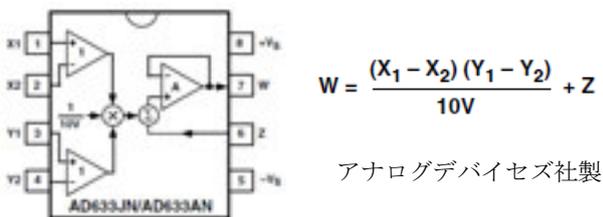


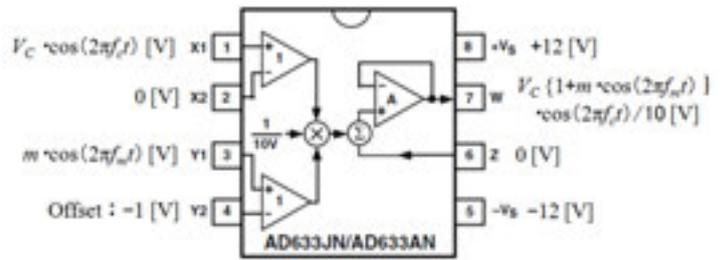
図6 乗算 IC (AD633) [5]の内部回路

乗算 IC の出力は $1/10$ になるため、送信アンプのオペアンプ増幅回路により 20 dB 増幅し、送信センサから超音波を送波する。なお、後述のように、調整時は送信アンプで 20 dB 減衰し、直接、受信入力に接続して波形を観測できるようにした。

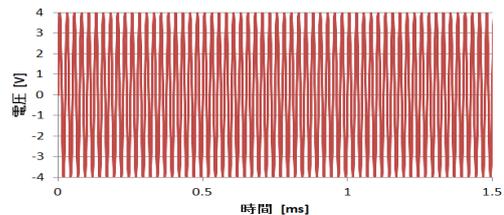
3.4 AM 変調の動作

図 7 a) に乗算 IC に加わる入出力信号を示す。さらに、同図 b) から e) に各部の波形をグラフ表示して示す。

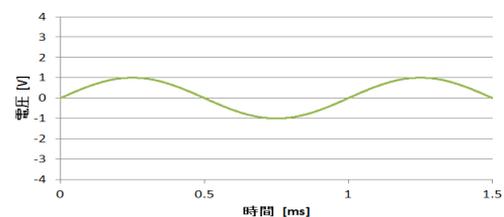
同図 b) は $X1$ 端子に $V_c=4 \text{ V}$ 、 $f_c=40 \text{ kHz}$ の搬送波を、同図 c) は $Y1$ 端子に $m=1 \text{ V}$ 、 $f_m=1 \text{ kHz}$ の信号波を、同図 d) はオフセットの $Y2$ 端子に -1 V を加えた内部波形 $Y1-Y2$ を、同図 e) は乗算後 $1/10$ されて W 端子からの出力波形 (式 4 相当) を示す。ここで、 m は信号波の振幅 1 V であると同時に変調度 100% を示し、AM 変調後には V_c と V_m は共に 0.4 V ($0.8 V_{pp}$) と等しくなる。



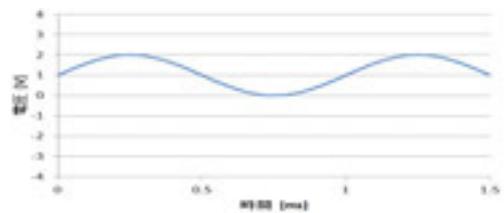
a) 入出力信号



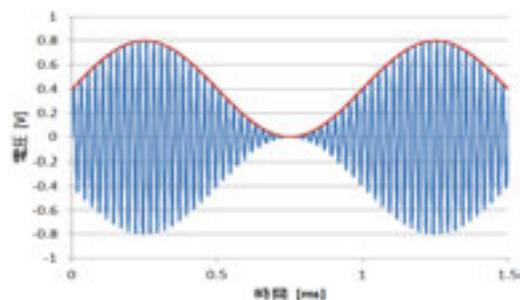
b) $X1$ 波形 ($V_c=4 \text{ V}$ 、 $f_c=40 \text{ kHz}$)



c) $Y1$ 波形 ($m=1 \text{ V}$ 、 $f_m=1 \text{ kHz}$)



d) $Y1-Y2$ 波形 ($Y2=-1 \text{ V}$)



e) W 波形 ($Z=0 \text{ V}$)

図7 AM 変調の動作

3.5 受信部

図 8 に受信部のレベルダイアグラムを示す。

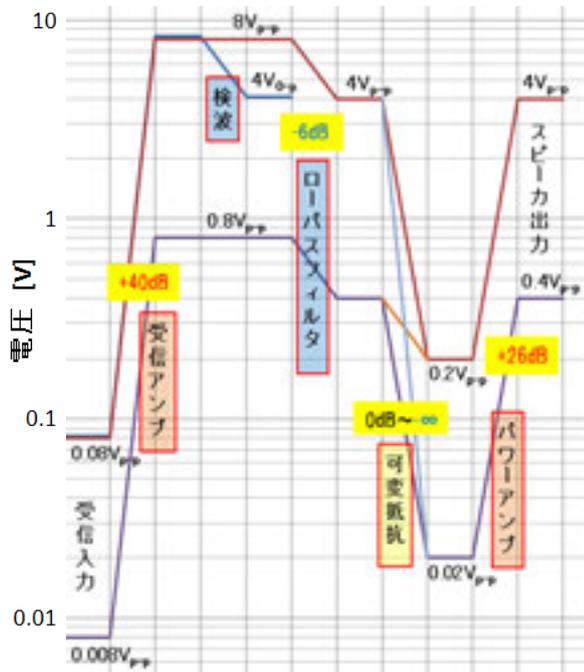


図 8 受信部のレベルダイアグラム

受信アンプは、超音波の空中伝搬による減衰を補正するように、オペアンプ増幅回路によって受信信号を 40 dB 増幅し、その後、ダイオードによる検波によって波形の正側のみを残し、オペアンプによる 2 次バターワース型ローパスフィルタにより、搬送波成分を除去して復調する。ローパスフィルタのカットオフ周波数は 3.4 kHz とし、40 kHz を除去した。

図 9 に受信アンプの周波数特性を、図 10 にローパスフィルタの周波数特性を示す。

これらの動作をレベルダイアグラムに表す際には、検波後にレベルが正側半分 (0 - ピーク電圧 V_{0-p}) になり、ローパスフィルタによって搬送波が消えて信号波のみが残り、検波波形が平均化されて信号波が 1/2 になる様子を表現した。

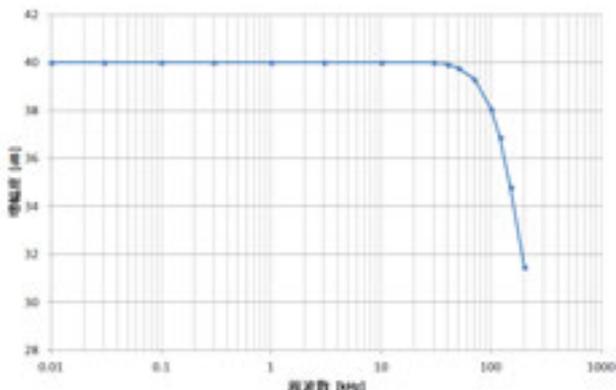


図 9 受信アンプの周波数特性

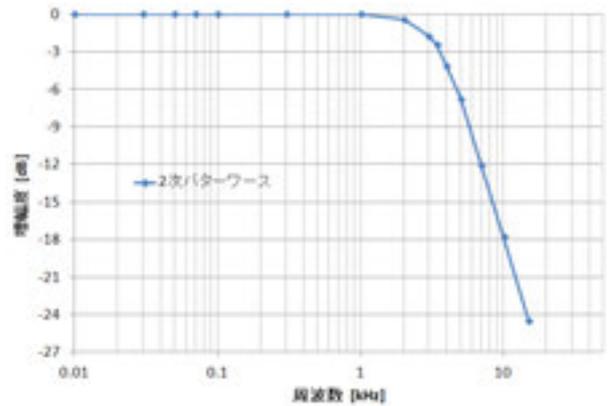


図 10 ローパスフィルタの周波数特性

スピーカ出力レベルは、信号が歪まない範囲で 4 ~ 0.4 V_{p-p} と設定した。受信入力からローパスフィルタまではすべて調整するところがないのでパワーアンプの前段に分圧用の可変抵抗を置き、ここで空中伝搬による減衰のレベル変動を吸収し最適な音量に調整する。図 11 に示すようにこの可変抵抗は手で回せるタイプとした。



図 11 スピーカ音量調整用の手回し可変抵抗

3.6 超音波送・受信センサ

表 2 に使用した超音波センサの仕様を示す。

ここで、送信音圧レベルとは、発振器から電圧 10 V_{rms} の信号を送信センサに印加した時の 300 mm の地点での音圧を示す。一般に 0 dB は人間の耳で聴こえる最小の音圧 20 μPa で定義されるので、115 dB の時は 11.2 Pa の音圧となる。1 気圧は 1013.3 hPa 相当なので、この音圧は約 1 / 10000 気圧の音圧レベルと考えられる。

表 2 超音波センサの仕様⁶⁾

型名	T40-16/R40-16
中心周波数	40 kHz
送信音圧レベル	115 dB 以上 (0 dB : 20 μPa)
受信感度	-64 dB 以上 (0 dB : 10 V/Pa)
-6dB 指向性	50 deg
静電容量	2400 pF
許容入力電圧	20 V _{rms}
外形寸法	16.2 mmφ×12.2 mm

一方、受信感度とは、基準送信センサから 300 mm の距離において、送信音圧レベル 94 dB の音場内に受信セ

ンサを置いた時に発生する電圧を示している。この音圧は 1 Pa に相当するので、受信感度 0 dB ならば 10 V が出力され、-64 dB では 6.31 mV が出力される。

今、送・受信センサを 300 mm の間隔で対向させた場合、送信センサへの入力電圧が 10 V_{rms} (28.3 V_{p-p}) の時、300 mm 地点での音圧が 11.2 Pa になるので、受信センサからの出力電圧は、6.31 mV×11.2=70.7 mV (0.2 V_{p-p}) となる。したがって、送・受信センサを 300mm の間隔に配置した時の入力電圧に対する出力電圧の比、つまり、空中伝搬による減衰は 43.0 dB に相当する。ただし、この値は仕様上の最小値であり、目安となるものの、送・受信センサの距離、中心周波数のズレや中心ビームからのズレによる減衰等で大きく変化する。

次に、超音波の空中伝搬による減衰について、図 12 に示すレベルダイアグラムによって、この基板が対応できる減衰レベルの範囲を考察する。なお、見やすくするために搬送波のラインは省略しておく。

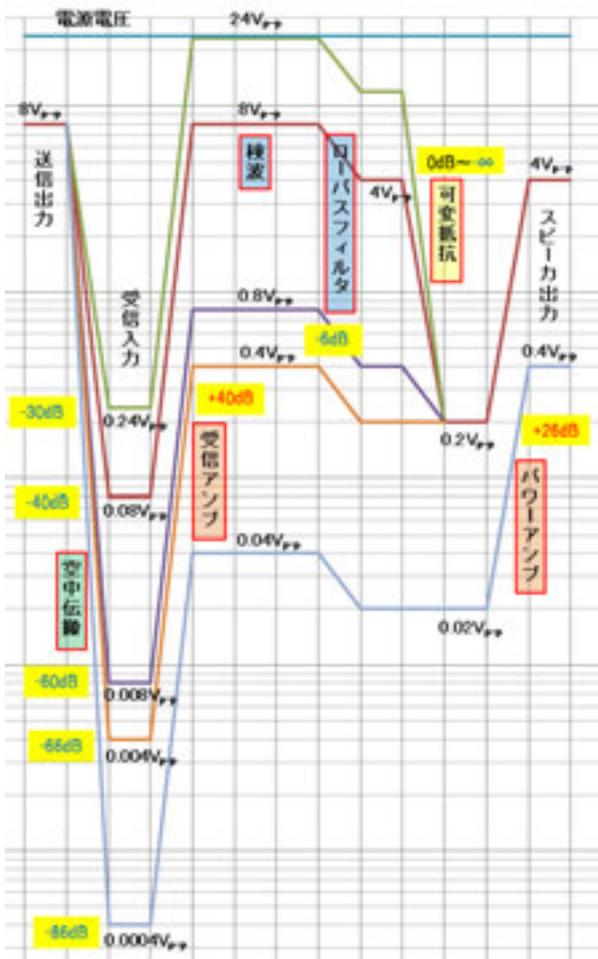


図 12 空中伝搬による減衰の考察

今、変調度を 100 % にした時、送信出力が 8 V_{p-p} となって送信され、空中伝搬で減衰し、受信アンプにて 40dB 増幅し復調された後、スピーカ出力が 4 V_{p-p} になるラインを考える。

空中伝搬による減衰が 30 dB の時は、電源電圧のラインのところまで信号レベルが上がり、これより減衰が小さいと受信信号が飽和することがわかる。一方、減衰が 66 dB の時は、分圧用の可変抵抗による調整がこれ以上できない 0 dB 減衰となる。したがって、空中伝搬の減衰範囲が 30 ~ 66 dB であれば、スピーカ出力が 4 V_{p-p} になるように可変抵抗によって音量調整できる。

さらに、スピーカ出力が 1/10 の 0.4 V_{p-p} でも良好な音量であるとする、空中伝搬による減衰範囲が 30 ~ 86 dB でもスピーカ出力範囲に音量調整が可能となる。

3.7 基板開発

基板の開発は、まず個々のブロックの回路を、図 13 に示すブレッドボード上に組み動作を確認した。

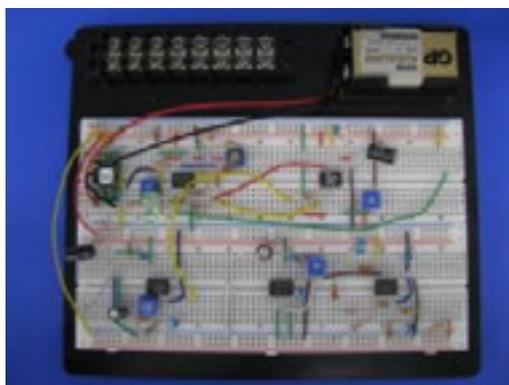


図 13 ブレッドボードによる動作確認



図 14 基板加工機による試作



図 15 基板の外注製造（初版）

その後、基板加工機によって、図 14 に示す試作基板を製作し、発振信号やアンプの増幅度等の動作確認や調整範囲、部品の配置等を検討した。さらに、部品シルクを追加し、基板の外注製造を行った。図 15 は初版の基板を示す。

4. 調整および動作確認

4.1 送信部の調整

図 16 の送信部の調整波形を示す。

基板をはんだ付け組立した後は、オシロスコープにより、乗算 IC の X1 端子が、同図 a) に示すような 40 kHz、8 V_{pp} の搬送波になるように、X2 端子が、同図 b) に示すように、マイク入力から外部発振器によって 1 kHz、2 V_{pp} の信号波になるように、オフセット電圧 Y2 を -1 V 加えながら、乗算 IC の出力 W が、同図 c) に示すような変調度 100 % (最大振れ幅 ±0.8 V) の AM 変調波になるよう調整する。

4.2 受信部の動作確認

初版の基板 (図 15) では超音波センサをはんだ付け実装されているため、受信部の動作確認は、約 300 mm 離れた平板からの反射によって受信信号を得ており、信号レベルが安定しないという問題があった。

ることにより、超音波センサをはんだ付けする際の熱による破損もなくなり、万一故障しても容易に交換できるように改善された。

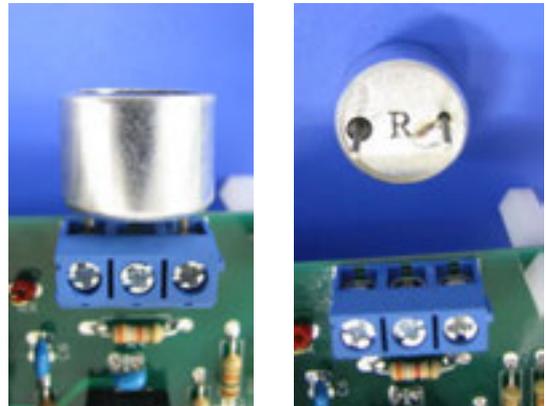


図 17 超音波センサの取り付け

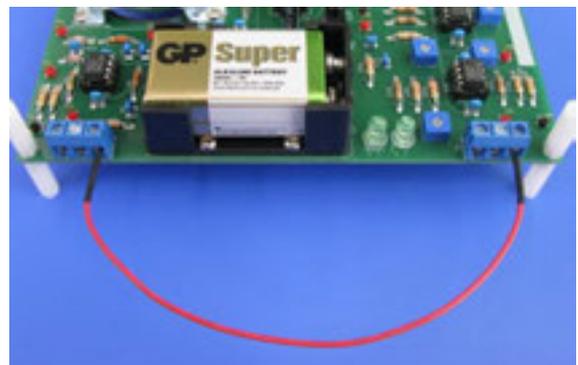
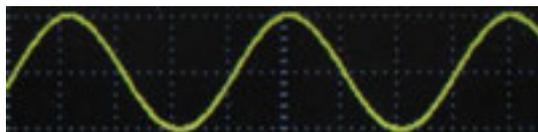


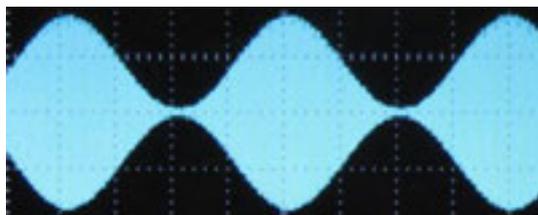
図 18 受信部動作確認のためのジャンパ接続



a) 搬送波形 (2 V/div, 10μs/div)



b) 信号波形 (1 V/div, 250μs/div)



c) AM 変調波形 (500 mV/div, 250μs/div)

図 16 送信部の調整波形

そこで、図 17 のように、送・受信の超音波センサをターミナルブロックの使用により取り外し可能とし、ジャンパ線で送・受信を直結できるように工夫した。こうす

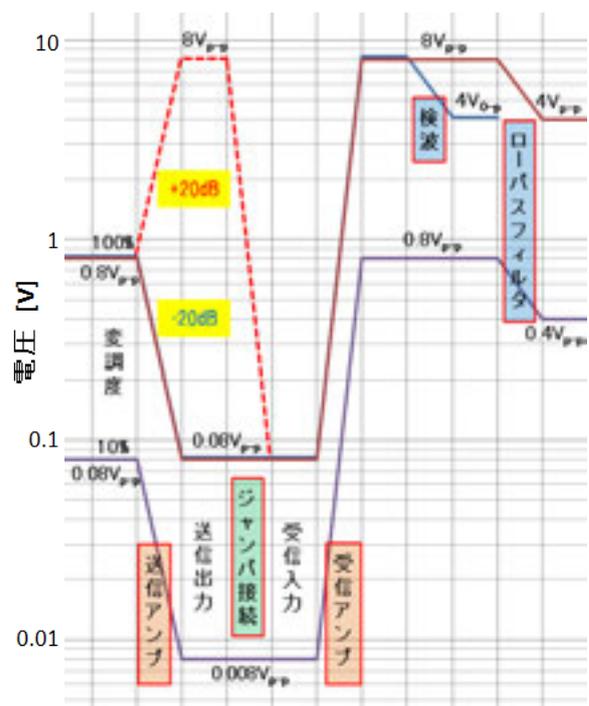
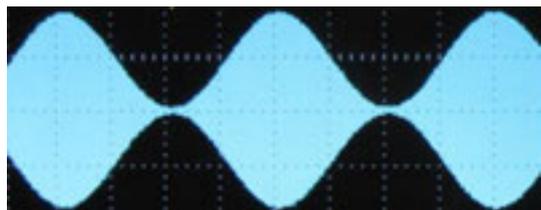
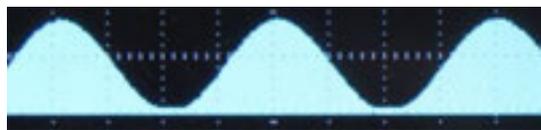


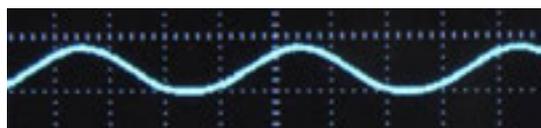
図 19 受信部動作確認のレベルダイアグラム



a) 40 dB 増幅後の受信波形 (5 V/div, 250 μ s/div)



b) 検波波形 (5 V/div, 250 μ s/div)



c) AM 復調波形 (5 V/div, 250 μ s/div)

図 20 受信部の動作確認波形

受信部の動作確認は、送信アンプを -20 dB として送・受信を直結し、受信アンプによる 40 dB 増幅後の受信波形、検波波形および AM 復調波形をオシロスコープにより観測して動作を確認する。図 18 にジャンパ線で送信と受信とをつないだ様子を示し、図 19 にこの時のブロックダイアグラムを示す。この図により、飽和することなく安定に受信部の動作確認が可能であることが示される。図 20 に受信部の動作確認波形を示す。同図 a) に 40 dB 増幅後の受信波形、同図 b) に検波波形、同図 c) に AM 復調波形を示す。

5. 研修の実施結果

平成 26 年 8 月に、指導員研修「超音波を応用した電子回路教材の開発事例」を実施した。訓練時間は 3 日間 18 時間で、受講生として参加した指導員は 2 名であった。

表 3 研修カリキュラム

研修項目	時間	備考
1 超音波の特性と応用 (1) 超音波の基本特性 (2) 最新の技術動向	2h	
2 総合制作実習の教材開発事例 (1) 共振波や伝搬波の伝播時間により距離を計測する応用 (2) ドップラ効果により移動体の速度を計測する応用 (3) 超音波を搬送波として音声通信を行う応用	2h	
3 距離計測応用 (1) 製作仕様と動作原理 (2) 設計と組立 (3) 動作検証	5h	
4 ドップラ応用 (1) 製作仕様と動作原理 (2) 設計と組立 (3) 動作検証	4h	
5 AM 復調応用 (1) 製作仕様と動作原理 (2) 設計と組立 (3) 動作検証	4h	

5.1 研修の実施

表 3 に研修カリキュラムを示す。

研修の実施は、まず超音波の基本特性や技術動向から始まり、これまでの総合制作実習の教材開発事例を示し、3 つに分類した超音波応用技術を①距離計測応用、②ドップラ応用、③通信応用について、1 日に 1 つずつそれぞれの教材基板を使用し、ブロック図から構成と動作原理を理解し、基板を組立てた後、波形を観測しながら調整や動作確認をして理解を深める内容とした。

基板は、IC ソケット、バイパスコンデンサ、チェック端子等、回路定数に無関係な部品はあらかじめ実装しておき、時間の節約を工夫したところ、60 分から 90 分で組立を完了することができた。

次に、電源部の短絡チェックから、各電源電圧の確認、送信部の調整、受信部の動作確認を行い、完成後は、受講生同士による音声等の送・受信試験や、壁の反射を利用した送・受信試験を行い伝搬距離の測定を行った。

なお、時間的な制約のため、増幅回路やフィルタ回路の周波数特性を測定する課題については、時間に余裕がある受講生のための自主課題とした。

また、あらかじめ受講生にはデジタルカメラや USB メモリの持参をお願いしておき、これらの信号波形や実験装置の撮影データや講習データ等を教材基板と共に持ち帰りできるように配慮した。

5.2 訓練の効果

最終日には、独自アンケートとヒアリングにより、受講生から研修に対する感想や意見等の収集したところ、

- ・ AM 変調・復調の基本が理解できた
- ・ 波形観測により動作が良くわかった
- ・ クリアに音声や音楽が伝わるので実用的である等の意見をいただいた。

特に、実際に波形を観測し、実際に音声等の送受信をしながらの実験は、理解する上での助けとなり大きな訓練効果を得ることができたものと考えられる。

また、オペアンプ回路については、

- ・ これまで個別回路の特性測定で終わっていた
- ・ オペアンプ回路のアプリケーションが欲しかった
- ・ 総合制作実習や応用課題に活用できる

等、指導員としての経験上の意見をいただいた。

本教材基板は、発振回路、増幅回路、加算回路、フィルタ回路を含んでいるので、電子系の回路設計課題や周波数特性等の測定実習に幅広く活用できるものと考えられる。その一方、ハードウェア経験の少ない指導員から、

- ・ 基本回路をブレッドボードで実験したい

との意見や、その他、

- ・ 水中用センサを使用しプールで実験したい

という意見もいただいた。これらは研修内容の検討事項として今後の課題としたい。

6. あとがき

指導員研修のための超音波を搬送波とした AM 送受信基板の開発について、開発仕様から、ブロック図による回路構成、レベルダイヤグラムによる設計、AM 変調・復調の原理、各部の動作波形、基板の開発過程と工夫、実際の指導員研修における実施内容と訓練効果について述べた。

特に、レベルダイヤグラムを使用することによって、電源電圧レベルを上限とした信号の飽和防止や、送信部では、音声信号からオーディオ信号と搬送波信号との AM 変調、送信するまでの信号レベルの変化を、受信部では、受信アンプから検波、AM 復調してスピーカ出力するまでの信号レベルの変化を示した。さらに、空中伝搬による減衰の許容変動範囲や動作確認時の信号レベルについても設計上の目安を知ることができた。

本教材基板は、回路設計や基板組立しながら波形を観測し、超音波で音声等を送受信して動作を理解できるよう開発し、実際の指導員研修に使用した際の受講生の意見から、十分な訓練効果が確認できたものと考えられる。

今後は、受講生からの意見を基に研修内容を検討して、よりよい指導員研修コースの策定を目指したい。

参考文献

1. 五十嵐茂: 総合制作実習における超音波を応用した教材の事例、平成 25 年度職業大フォーラム講演論文集, pp68-69 (2013)
2. 五十嵐茂: 総合制作実習における超音波を応用した教材開発、職業能力開発研究誌, 30 巻, 1 号, pp149-156 (2014)
3. 五十嵐茂: 指導員研修に向けた「超音波式 AM 送受信機」の教材開発、平成 26 年度職業大フォーラム講演論文集, pp124-125 (2014)
4. <http://www.fuji-us.co.jp/products/sea/fitphone.html>, 水中トランシーバーFUJI FIT PHONE、富士工業㈱
5. アナログ乗算 IC AD633 データシート アナログデバイセス
6. 空中用超音波センサ T/R40-16 データシート 日本セラミック株式会社

(原稿受付 2015/1/16、受理 2015/2/26)

*五十嵐茂,
職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町
2-32-1 email:s-igarashi@uitech.ac.jp
Shigeru Igarashi, Polytechnic University, 2-32-1 Ogawa-Nishi-Machi,
Kodaira, Tokyo 187-0035