

AM同期検波の原理を理解しよう

作成者：出口 憲 kdeguchi@sz.tokoha-u.ac.jp

2022年11月7日版

この文書では電波の基本的な話から始めてAM同期検波の原理までを理解しようというものです。数式を理解するためには三角関数の理解が必要です。

この文書の利用規定

- この文書の利用により生じた問題に関して出口 (kdeguchi@sz.tokoha-u.ac.jp) は責任を取れません。内容の正確性などについて疑問が生じた場合は必ず他の文献や情報も参照してください。
- 配布・利用は自由ですが、この文書の内容の改変及び削除をしないでください。
- 著作権は出口 (kdeguchi@sz.tokoha-u.ac.jp) にあります。
- 間違いなどを発見した場合は出口 (kdeguchi@sz.tokoha-u.ac.jp) までご連絡いただければ幸いです。

目次

1	電波の基本的な話	1
2	電波で音声を送るとは?	2
3	AMの電波とはどのようなものか?	2
4	混信がある場合	4
5	通常の見波 (包絡線見波)	5
6	同期見波	6
6.1	USB+LSBの音声信号の見波	6
6.2	USB+LSBでは混信は除去できない	7
6.3	USB-LSBの音声信号の見波	7
6.4	USBとLSB信号の取り出し	9
A	三角関数の加法定理	9
B	更新履歴	10

1 電波の基本的な話

電波とは名前の通り波の仲間です。ある場所で発生した振動が周囲に伝わる現象を波といいます。電波は振動する電流によって発生した電界(電場)と磁界(磁場)が周囲に伝わる現象です。波を特徴づける量として、**振幅**、**周波数**、**波長**などがあります。

振幅 振幅は波の振動の大きさをあらわす量です。振幅の大きい電波は強い電波ということになります。

周波数 周波数は波のある時間内の振動回数をあらわす量です。周波数が高い電波は振動回数が多いということです。

波長 波長は波が1回振動するあいだに進む距離です。波長はアンテナの大きさを決定するときに重要な量です。

これらを図1に示します。

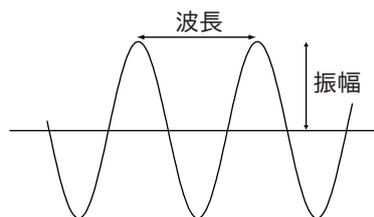


図 1: 波を特徴づける量。横軸は距離である。

一般に、周波数 f と波長 λ (ラムダと読みます)の間には(1)式の関係があります。

$$v = f\lambda \quad (1)$$

ここで、(1)式の左辺の v は波の進む速さです。電波の進む速さは光と同じですから、電波の進む速さは秒速 30 万 km = 3×10^8 (m/s) です。

(1)式を使って波長を計算してみましょう。例えば、文化放送の周波数は 1,134kHz です。周波数に用いられる Hz という単位は 1 秒間に波が振動する回数をあらわす量なので $\text{Hz} = 1/\text{s}$ です。1,134kHz = 1,134,000Hz = 1.134×10^6 Hz ですから、(1)式を使って波長を求めると、

$$\lambda_{\text{(文化放送)}} = \frac{3 \times 10^8 \text{(m/s)}}{1.134 \times 10^6 \text{(1/s)}} = 264.6 \text{(m)} \quad (2)$$

このように中波放送で用いられている電波の波長は非常に長い(約 200m~600m 程度)ことが分かります。本来なら、アンテナの大きさもこれ位になってしまいますが、それでは大変なので受信には小型にできるバーアンテナやループアンテナが用いられます。送信に使われているアンテナは電波の波長と同じくらいの大きなもの(高さ 100m 程度)です。

2 電波で音声を送るとは？

電波をそのまま送信しても音声は送れません。何らかの方法で電波に音声信号を含ませる必要があります。音声などの信号を波に載せて送ることを**変調**といいます。逆に波から信号を取り出すことを**検波**といいます。

AM(Amplitude Moduration)とは信号を波に載せる方法のことです。日本語では**振幅変調**といいます。振幅変調という名前からも分かる通り、音声などの信号を載せるために波の振幅を変える方法です。AM放送というと中波で行われている放送を思い浮かべる人が多いかもしれませんが、短波の放送もAMですし、テレビの映像信号もAMです。ちなみに、FM(Frequency Moduration)は周波数を変化させて信号を送る方法です。

音声などの信号を載せる元の波を**搬送波**といいます。放送局の周波数は搬送波の周波数のことです。

3 AMの電波とはどのようなものか？

AMは搬送波の振幅を変化させるものです。今、搬送波が(3)式であらわせるとします。

$$A \cos(2\pi Ft) \quad (3)$$

ここで、 A は搬送波の振幅、 F が搬送波の周波数、 t は時間、 π は円周率です。この状態では図2のような振幅が一定の波が発生しているだけです。

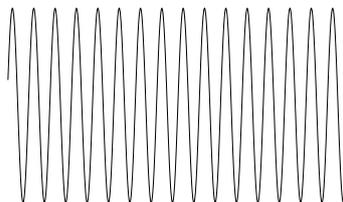


図 2: 搬送波の波形.

次に、送りたい音声信号が(4)式であらわせるとします。

$$\cos(2\pi ft) \quad (4)$$

音声などの信号も波ですから同じように三角関数であらわせます。ただし、搬送波の周波数 F は、音声信号の周波数 f に比べると非常に大きい ($F \gg f$) としておきます。こうしないと信号をうまく送れないからです。通常の中波放送(日本の場合、530kHz~1,620kHz程度)では音声信号(20Hz~20,000Hz)の100~1,000倍くらい高い周波数の電波を使っています。

振幅変調とは (3) 式の振幅 A を変えることですから, (5) 式のようにあらわせます.

$$A\{1 + m \cos(2\pi ft)\} \cos(2\pi Ft) \quad (5)$$

ここで, m は変調度という量で音声信号をどの程度含ませるかを定める量です. 通常, $m < 1$ とします. $m > 1$ とすると過変調となり音声が歪んでしまいます. (5) 式を波形としてあらわしたものを図 3 に示します. 振幅の変化が音声信号であり波形は上下対称になっています.

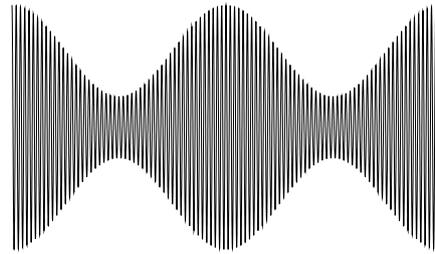


図 3: AM 信号の波形. これは単音 (音の周波数が 1 つ) だけの場合なので実際の AM 信号の波形はもっと複雑である.

さらに, (5) 式を (6) 式のように変形します. ここで, 三角関数の加法定理¹を使います.

$$\begin{aligned} & A\{1 + m \cos(2\pi ft)\} \cos(2\pi Ft) \\ &= A \cos(2\pi Ft) + Am \cos(2\pi ft) \cos(2\pi Ft) \\ &= \underbrace{A \cos(2\pi Ft)}_{\text{搬送波}} + \underbrace{\frac{Am}{2} \cos(2\pi(F+f)t)}_{\text{上側帯波 (USB)}} + \underbrace{\frac{Am}{2} \cos(2\pi(F-f)t)}_{\text{下側帯波 (LSB)}} \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式を見ると 3 つの部分から成り立っていることが分かります. 第 1 の部分は元の搬送波 (周波数 F), 第 2 の部分は搬送波の周波数よりも音声信号の周波数だけ高い信号 (周波数 $F+f$), 第 3 の部分は搬送波の周波数よりも音声信号の周波数だけ低い信号 (周波数 $F-f$) をあらわしています. 周波数 $F+f$ の部分を **上側帯波** (Upper Side Band, *USB*), 周波数 $F-f$ の部分を **下側帯波** (Lower Side Band, *LSB*) と呼びます. *USB* と *LSB* には同じ周波数 f の音声信号が含まれていることが分かります. 実際の音声信号では含まれている周波数は 1 つではないので側帯波はある程度の広がりを持っています. 側帯波の幅を **帯域幅** といいます. この帯域幅が広いほど音質は向上します. 中波放送では帯域幅が搬送波の $\pm 7.5\text{kHz}$ と決められていますから高音部分が抜けています. 一方, VHF 帯を使う FM 放送は音声の帯域幅が 15kHz まであります. これが, 中波の AM 放送と FM 放送の音質の違いに大きく影響しています. AM 放送は音質が悪いといわれますが, AM という方法に問題があるのではなくて帯域幅の問題なのです. 一般の AM 信号の周波数分布がどうなっているかを図 4 に示します.

¹末尾の三角関数の加法定理を参照.

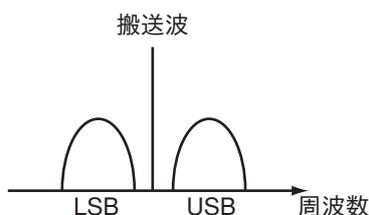


図 4: AM 信号の周波数分布. 搬送波の上と下に側帯波 (USB, LSB) が存在する. USB と LSB は搬送波に対して対称に分布する.

4 混信がある場合

混信があるときは USB や LSB に隣の放送局の USB や LSB が重なっています. 混信があるときの AM 信号は (7) 式のようにあらわせます.

$$A \cos(2\pi Ft) + \frac{Am}{2} \cos(2\pi(F + f)t) + \frac{Am}{2} \cos(2\pi(F - f)t) + \overbrace{\frac{Bm'}{2} \cos(2\pi(F' \pm f')t)}^{\text{混信成分}} \quad (7)$$

ここで, 最後の部分が隣の放送局からの混信をあらわします. (7) 式は複雑なのでほぼ同じ意味の (8) 式に直します.

$$A \cos(2\pi Ft) + U \cos(2\pi(F + u)t) + L \cos(2\pi(F - l)t) \quad (8)$$

混信があるときは USB や LSB が変化したと考えられるので (8) 式のように USB と LSB に含まれる信号が違ふと考えます. 混信がないときは USB と LSB に含まれる信号は一緒ですが, 混信があるときの USB と LSB の信号は放送局が送り出す本来の信号とは違ってしまいます. 周波数の隣接する放送局が音楽などをかけるとチャカチャカと聞こえてくるのはこのためです. 混信がある場合の AM 信号の波形の例を図 5 に, 周波数分布を図 6 に示します.

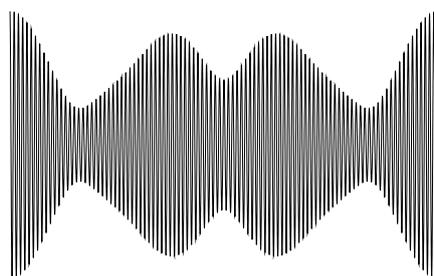


図 5: 混信により変化してしまった AM 信号の波形.

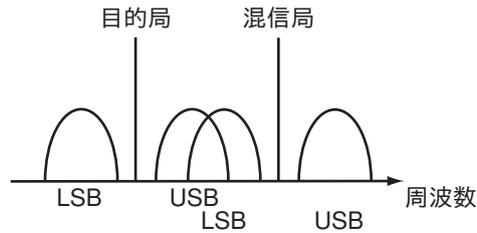


図 6: 混信が起きている状態の周波数分布. 目的の放送と隣の放送の側帯波が重なっている.

5 通常の検波 (包絡線検波)

AM 信号を検波する一番簡単な方法を説明します. AM 信号の振幅変化が音声信号ですから細かい振動を無視して波形を滑らかにつなげればよいことが分かります. このような検波方法を**包絡線検波**といいます. このためには, 上下対称のままだと ± 打ち消しあってしまうので下半分を削ります. これには電流を一方向にしか流さないダイオードなどの整流素子が利用できます. 図 3 から半分削ると図 7 のようになります.

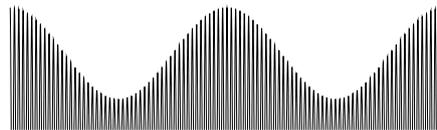


図 7: AM 信号を半分削った状態.

図 7 のように半分削った状態でも音声信号として聞けないわけではありませんが, もう少し音をよくするため細かい振動を無視して滑らかにつなぐ必要があります. これにはコンデンサーなどを用います. 最終的に図 8 のような音声に相当する信号波形が得られます.

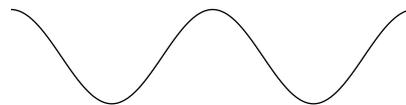


図 8: 得られる音声信号.

このような整流素子を使った包絡線検波は簡単に利用できるため多くのラジオに使われています. しかし, 次に紹介する同期検波と比べると信号の再現性は低い方法です. また, 図 5 のように混信がある場合の波形をもとに検波すれば, 得られる音声信号は混信の影響を受けた状態になってしまいます.

6 同期検波

同期検波とは搬送波に同期した信号によって検波を行う方法です。同期検波を整理すると図9のようにあらわせます。図9を見ると入力された信号から USB と LSB の音声信号を別々に取り出す過程が理解できるでしょう。

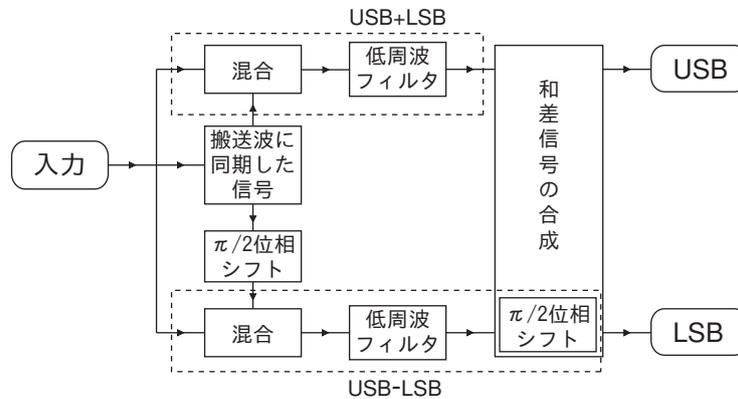


図 9: 同期検波の流れ.

6.1 USB+LSB の音声信号の検波

図9の破線で囲った USB+LSB の部分を詳しく説明しましょう。まず、入力信号から搬送波に同期した信号を生成し受信信号と混ぜてやります。「混ぜる」という操作は数式ではかけ算になります。(8)式であらわされる混信がある場合の AM 信号に搬送波と同じものをかけ算して見ると、

$$\begin{aligned}
 & \cos(2\pi Ft) \times [A \cos(2\pi Ft) + U \cos(2\pi(F+u)t) + L \cos(2\pi(F-l)t)] \\
 = & \underbrace{A \cos^2(2\pi Ft)}_{\text{直流成分}} + \underbrace{U \cos(2\pi Ft) \cos(2\pi(F+u)t) + L \cos(2\pi Ft) \cos(2\pi(F-l)t)}_{\text{高周波成分}} \\
 = & \frac{A}{2} + \frac{A}{2} \cos(2\pi(2F)t) + \frac{U}{2} \cos(2\pi(2F+u)t) + \frac{L}{2} \cos(2\pi(2F-l)t) \\
 & \quad \underbrace{\frac{U}{2} \cos(2\pi ut) + \frac{L}{2} \cos(2\pi lt)}_{\text{USB と LSB の音声成分}} \tag{9}
 \end{aligned}$$

ここでも三角関数の加法定理²を適用して(9)式のように変形しました。(9)式を波形としてあらわした例を図10に示します。

(9)式を見ると、最後の部分に USB と LSB の音声成分そのものがあらわれていることが分かります。その前の部分は周波数が搬送波の2倍(2F)という高いものと定数(1/2)だけで、そ

²末尾の三角関数の加法定理を参照。

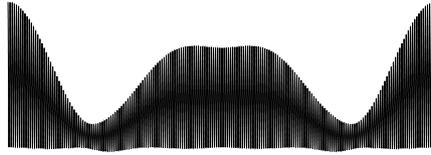


図 10: (9) 式であらわされる混信がある場合の波形の例. 振動の間隔が狭いのは振動が 2 倍になっているため.

それぞれ高周波成分と直流成分を意味しています. 高周波の部分は低周波フィルターで除去でき, 直流成分はコンデンサーなどを使って除去できます. 結局, (10) 式に示した USB+LSB の音声成分だけ取り出せるわけです. これは整流素子を使う方法よりも忠実度の高い検波方法になっています.

$$\frac{U}{2} \cos(2\pi ut) + \frac{L}{2} \cos(2\pi lt) \quad (10)$$



図 11: (10) 式であらわされる混信がある場合の USB+LSB の音声波形の例. 図 10 を滑らかにつないだものとなっていることが分かる.

6.2 USB+LSB では混信は除去できない

同期検波で検波できましたが USB+LSB の音声信号では混信は除去できていません. 図 6 を見ると USB か LSB のどちらかだけ取り出せば混信の少ない状態を実現できることが理解できるでしょう. 図 6 で LSB は混信していませんから, LSB 成分だけ取り出せば混信がなくなると分かります. 実際の受信でも, 目的とする放送局の周波数の高い側か低い側のどちらか一方の放送と混信している場合がほとんどです.

6.3 USB-LSB の音声信号の検波

混信を除去するために図 9 の破線で囲った USB-LSB という信号を生成することを考えます. USB-LSB は混信成分と考えることができます. このような差の信号は同期検波の仕組みを利用して簡単に生成できます.

まず, 搬送波に同期するように生成した信号と位相が 90 度 (角度にラジアンを使うと $\pi/2$) 異なる信号を作って受信信号に混ぜます. 位相が 90 度 ($\pi/2$) 異なるのは $\cos(2\pi Ft)$ に対して

$\sin(2\pi Ft)$ ですから,

$$\begin{aligned}
 & \sin(2\pi Ft) \times [A \cos(2\pi Ft) + U \cos(2\pi(F+u)t) + L \cos(2\pi(F-l)t)] \\
 &= A \sin(2\pi Ft) \cos(2\pi Ft) + U \sin(2\pi Ft) \cos(2\pi(F+u)t) + L \sin(2\pi Ft) \cos(2\pi(F-l)t) \\
 &= \overbrace{\frac{A}{2} \sin(2\pi(2F)t) + \frac{U}{2} \sin(2\pi(2F+u)t) + \frac{L}{2} \sin(2\pi(2F-l)t)}^{\text{高周波成分}} \\
 & \quad \underbrace{-\frac{U}{2} \sin(2\pi ut) + \frac{L}{2} \sin(2\pi lt)}_{\text{USB と LSB の音声成分}} \tag{11}
 \end{aligned}$$

(11) 式の変形にも三角関数の加法定理³を使います. (11) 式を波形としてあらわした例を図 12 に示します.

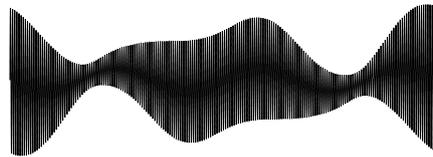


図 12: (11) 式であらわされる混信がある場合の波形の例. USB-LSB とは混信成分だけを取り出したものと考えればよい.

(11) 式を見ると (9) 式とよく似ています. 最後にある部分が USB と LSB の音声信号の部分です. その前の部分は (9) 式と同じく高周波成分ですから, 低周波フィルターを使って切り捨てられます. 結局, 残るのは (12) 式です.

$$-\frac{U}{2} \sin(2\pi ut) + \frac{L}{2} \sin(2\pi lt) \tag{12}$$

しかし, このままでは (10) 式と足し算や引き算ができないので, (12) 式の位相を 90 度 ($\pi/2$) ずらして (13) 式のようにすると USB-LSB の信号を取り出せます.

$$-\frac{U}{2} \sin\left(2\pi ut - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{L}{2} \sin\left(2\pi lt - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U}{2} \cos(2\pi ut) - \frac{L}{2} \cos(2\pi lt) \tag{13}$$



図 13: (13) 式であらわされる混信がある場合の USB-LSB 音声波形の例.

³末尾の三角関数の加法定理を参照.

6.4 USB と LSB 信号の取り出し

(10) 式と (13) 式を足すと,

$$U \cos(2\pi ut) \quad (14)$$

(10) 式から (13) 式を引くと,

$$L \cos(2\pi lt) \quad (15)$$

これで, USB と LSB を分離できたのでどちらか一方を選択して受信できるわけです.



図 14: USB から得られる音声波形. 混信の影響を受けている側である.



図 15: LSB から得られる音声波形. 混信を受けていない側であるため影響はない.

A 三角関数の加法定理

三角関数の加法定理とは次のような関係式のことをいいます.

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta \quad (16)$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta \quad (17)$$

(16), (17) 式から次の式も導けます.

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2}(\cos(A + B) + \cos(A - B)) \quad (18)$$

$$\sin A \sin B = \frac{1}{2}(\cos(A + B) - \cos(A - B)) \quad (19)$$

$$\sin A \cos B = \frac{1}{2}(\sin(A + B) + \sin(A - B)) \quad (20)$$

AM の周波数分布を説明する (6) 式や同期検波の (9), (11) 式の計算を行う際に用いたのが, (18), (19), (20) 式です. 数学は役に立ちますね.

B 更新履歴

2002年1月24日版 文書を公開.

2002年1月25日版 利用規定と USB-LSB に関する内容を一部修正.

2004年3月2日版 周波数表記の間違いを修正.

2022年11月7日版 メールアドレスを修正. 他の修正はありません.

参考文献

- [1] 短波マニアのちょっと気になるキーワード…“同期検波”の秘密, 大島理夫, 「ラジオの製作」1994年6月号 131~133 ページ, 電波新聞社