

第2回 音がいい！FM ラジオ AM も復調できる！ IQ 復調タイプ！ (補足資料)

本資料は「[トランジスタ技術](#)」CQ 出版社の 2015 年 5 月号の付録「[トラ技ジュニア](#)」2015 年 5・6 月号に掲載された記事の補足資料です。本誌では紙数の制限から書ききれなかった内容をここに記しています。ラジオを作る上で必要な電子部品の基礎知識や購入先の紹介です。本誌掲載のソフトウェア・ラジオを作ってみようと思われた方の役に立つであろう情報をまとめてあります。

目次

1. [ブレッドボード](#)
2. [AM同調回路](#)
3. [高周波増幅回路](#)
4. [ミキサ](#)
5. [局部発振回路](#)
6. [低周波増幅回路](#)
7. [電池ボックス](#)
8. [部品購入先](#)
9. [CORDIC の仕組み](#)
10. [FM 変調（基礎知識の補足）](#)
11. [直交ミキサ回路の各部の波形を観測してみよう](#)

[本資料の Web ページ](#)

[著者の Web ページ](#)

1. ブレッドボード
2. AM同調回路
3. 高周波増幅回路
4. ミキサ

以上の項目は、[第1回補足資料](#)を参照してください。

5. 局部発振回路

本文図 6 の \sin 波と \cos 波の生成のために D フリップフロップを 2 個内蔵した 74HC74 (IC₄) を使います。発振モジュール(IC₃)の出力信号(周波数 f_{osc})を 1/4 分周して、 90° 位相のずれた \sin 波と \cos 波(周波数 f_o)を生成します。

図 A.2 に、局部発振信号($f_o=70\text{kHz}$)の出力信号を示します。発振モジュールの発振周波数 f_{osc} は 280kHz です。正弦波ではなく矩形波で代用しています。 $\text{sign}(x)$ は $x \geq 0$ のとき 1, $x < 0$ のとき 0 となる関数です。

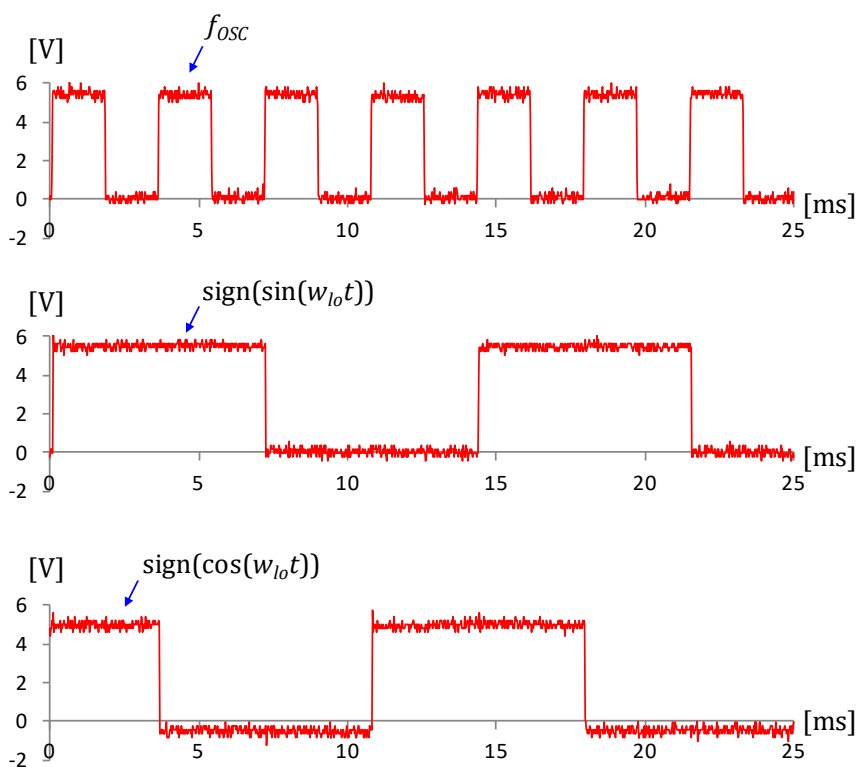


図 A.2 $\text{sign}(\sin(\omega ct))$, $\text{sign}(\cos(\omega ct))$ の測定例

6. 低周波増幅回路
7. 電池ボックス

以上の項目は、[第1回補足資料](#)を参照してください。

8. 部品購入先

表 A.1 は部品の購入先の例です。必要な部品は全てネットで購入できます。表の例に限らず、ネットには多くの通販の店があります。

表 A.1 部品購入先

記号	部品	型式・定格	単価(円)	数量	2015年4月10日現在
					購入先
Tr1	MOS-FET	2SK241-Y	(5個入り) 200	1	秋月電子通商
IC4	Dフリップフロップ	SN74HC74N	20	1	〃
IC1	アナログスイッチ	SN74HC4066N	30	1	〃
L2	インダクタ(マイクロインダクタ)	470μH	(10個入り) 100	1	〃
IC3	オシレータモジュール	LTC1799モジュール	450	1	〃
IC2	オペアンプ	NJM4580DD	40	1	〃
VR2	可変抵抗	5kΩ	40	1	〃
VR3, VR9	(半固定ボリューム)	20kΩ	40	2	〃
	ステレオ・ミニプラグ	3.5mmΦ	50	1	〃
SW1	スライドスイッチ	1回路2接点	(4個入り)100	1	〃
C2, C3	積層セラミックコンデンサ	0.1μF, 50V	(25個入り) 100	2	〃
C4~C9		100μF, 6.3V	(10個入り) 400	6	〃
	耐熱通信機器用ビニル電線 (ブレッドボード配線用)	協和ハーモネット 2m×10色 外径0.65mm	620	1	〃
	耐熱電子ワイヤー (ステレオミニプラグ用)	協和ハーモネット 2m×7色 外径1.22mm	480	1	〃
VR6	多回転可変抵抗	2kΩ	80	1	〃
VR5	(多回転半固定ボリューム)	50kΩ	80	1	〃
R4, R7, R8, R10	抵抗	2.2kΩ 1/4W	(100本入り) 100	4	〃
R1		1MΩ 1/4W	(100本入り) 100	1	〃
	電池ボックス	単三×4本, スイッチ付	110	1	〃
L1	バーアンテナ	SL-55X 600±20μH	340	1	電子パーツ通販KURA
	ブレッドボード	EIC-801もしくは BB-801	270, 200	1	秋月電子通商
C1	ポリバリコン	2連, 150pF+70pF	250	1	電子パーツ通販KURA
	ポリバリコン用ダイヤル		80	1	電子パーツ通販KURA
	FMラジオキット	TK-734R	1863	1	アマゾン
	はんだごて	30W	800	1	秋月電子通商
	こて先クリーナー	ST030	270	1	〃
	はんだ	0.8mm	210	1	〃
	ワイヤーストリッパー	YS-2	1300	1	〃
	ニッパー	NI3-120	1850	1	〃
	デジタルマルチメータ(テスタ)	M-830B	1000	1	〃

9. CORDIC の仕組み

CORDIC は Coordinate Rotation Digital Computer の略です。加減算とビットシフト演算のみにより、[本文の式\(5\), \(6\)](#)の A_k, θ_k を精度良く求める計算法です。CORDIC のアルゴリズムは以下の通りです。時刻 t_k における I, Q 信号のサンプル値を I_{k0}, Q_{k0} とします。また、 $\theta_{k0} = 0$ とします。

もし、 $Q_{kn} \geq 0$ のとき

$$\begin{aligned} I_{k(n+1)} &= I_{kn} + (1/2)^n Q_{kn} \\ Q_{k(n+1)} &= -(1/2)^n I_{kn} + Q_{kn} \\ \theta_{k(n+1)} &= \theta_{kn} + \tan^{-1}(1/2)^n \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

もし、 $Q_{kn} < 0$ のとき

$$\begin{aligned} I_{k(n+1)} &= I_{kn} - (1/2)^n Q_{kn} \\ Q_{k(n+1)} &= (1/2)^n I_{kn} + Q_{kn} \\ \theta_{k(n+1)} &= \theta_{kn} - \tan^{-1}(1/2)^n \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

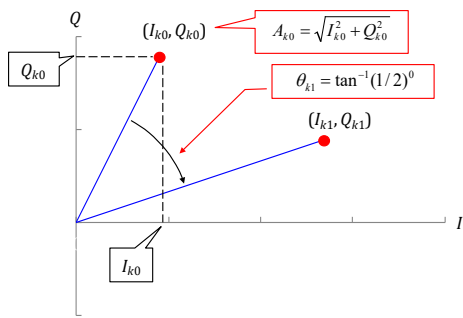
とします。 $n=0$ から始めて、 n を1つずつ増やして、 Q_{kn} が十分に小さくなるまで式(A.1), (A.2)の計算を繰り返します。 $(1/2)^n Q_{kn}$ の計算は Q_{kn} を n ビット右にシフトすればよく、 $\tan^{-1}(1/2)^n$ の計算は、数表を用意しておけばよいです。

図A.1はCORDIC演算が何をやっているのかを示すイメージ図です。同図(a)は I_{k0}, Q_{k0} に対して式(A.1)を適用した様子を示します。 I_{k0}, Q_{k0} の点は I_{k1}, Q_{k1} の点に移動しています。振幅 A_{k1} は A_{k0} より少し大きくなり、位相 θ_{k1} は $\tan^{-1}(1/2)^0$ だけ時計回りに回転しています。同図(b)は $n=1$ として式(A.1)を適用し、(c)では $n=2$ として式(A.2)を適用しています。(c)では反時計回りに回転しています。(d)は n を十分に大きくしたときの I_{kn}, Q_{kn} の収束点を示しています。

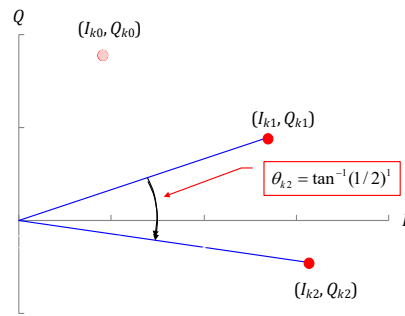
$$\begin{aligned} A_{kn} &\rightarrow I_{k\infty} = 1.64676 A_{k0} \\ \theta_{kn} &\rightarrow \tan^{-1}(Q_{k0} / I_{k0}) \quad (n \rightarrow \infty) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

となります。振幅は A_{k0} の定数倍の値が求まっています。位相は時刻 t_k における I, Q-信号の位相 θ_k が求まっています。AM復調では I_{kn} の値をCORDICの出力とし、FM復調では1時刻前の位相との差分値 $\theta_{kn} - \theta_{(k-1)n}$ を出力とします。12ビットを超える精度を得るには $n > 12$ とします。

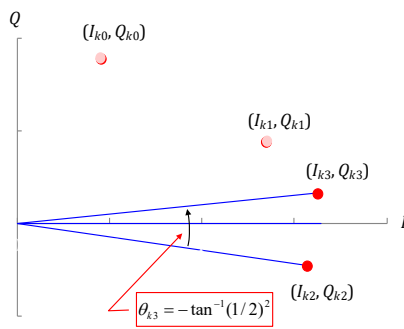
以上の計算は加減算とシフト演算のみであるため、数値演算専用プロセッサを持たないCPUであっても、高速処理が可能です。



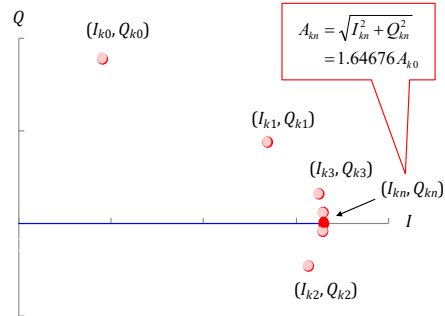
(a) 1回目の回転



(b) 2回目の回転



(c) 3回目の回転



(d) n 回目の回転

図 A.1 CORDIC による I, Q 信号からの振幅・位相情報の抽出の様子

10. FM 変調 (基礎知識の補足)

[本文の式\(2\)](#)を少し丁寧に導出します。

音声信号を $v_s = \cos(2\pi f_s t)$ とすると、放送波の周波数 f_R は

$$f_R = f_c + m_{FM} \cos(2\pi f_s t) \quad (1)$$

と変調されます。ここで、 π は円周率、 f_s は音声信号の周波数、 t は時間、 m_{FM} は周波数偏移です。

今、放送波 v_R が

$$v_R = A_c \cos \theta_R$$

と表されるとします。 A_c は放送波の振幅、 θ_R は位相です。位相 θ_R と周波数 f_R は

$$\theta_R = 2\pi \int f_R dt$$

と積分の関係にあります。これより

$$\begin{aligned} \theta_R &= 2\pi \int \{f_c + m_{FM} \cos(2\pi f_s t)\} dt \\ &= 2\pi f_c t + \frac{m_{FM}}{f_s} \sin(2\pi f_s t) \end{aligned}$$

となります。よって、放送波 v_R は

$$v_R = A_c \cos \left(2\pi f_c t + \frac{m_{FM}}{f_s} \sin(2\pi f_s t) \right) \quad (2)$$

という FM 信号となります。

11. 直交ミキサ回路の各部の波形を観測してみよう

直交ミキサ方式の I, Q 信号波形を観測しました. 図 A.3 は, [本文の図 6](#) において, AM 変調波を高周波増幅回路に入力したときのオペアンプ IC_{2A}, IC_{2B} の出力波形例です. ただし, IC_{2A}, IC_{2B} にはコンデンサを付加してローパスフィルタとして計測しました. AM 変調波は変調度 $m = 0.5$, 音声信号の周波数 $f_s = 2$ [kHz], 搬送波の周波数 $f_c = 700$ [kHz] としました. 局発信号の周波数 $f_{lo} = 700$ [kHz] とすることで, オペアンプの出力 $V_{IC2Aout}$, $V_{IC2Bout}$ に I 信号, Q 信号が得られました. この例ではたまたま Q 信号が 0 だったので, I 信号に AM 変調波の振幅が現れています.

図 A.4 は FM 変調波を入力したときの出力波形例です. [本文の式\(2\)](#) において, $f_c = 70$ [kHz], $f_s = 2$ [kHz], $m_{FM}/f_s = 2$ とした場合です. I, Q 信号には 70 [kHz] 付近の大きな成分が載っていますが, パソコンのサウンドカードに備えられているアンチエイリアスフィルタによりこの成分は除去され, [本文の図 5](#) に示す原理による音声信号抽出が可能です.

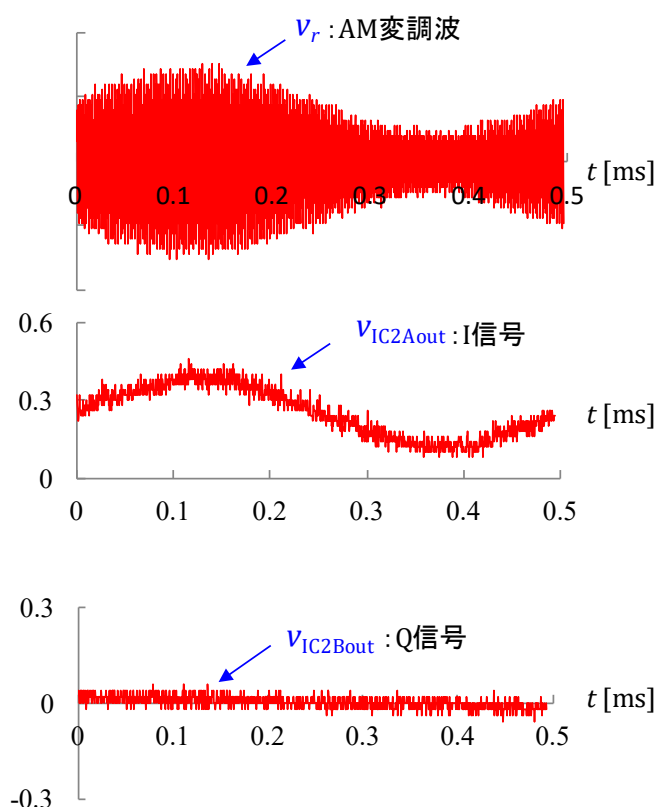


図 A.3 直交ミキサ方式により得られた I 信号と Q 信号(AM 受信の場合)

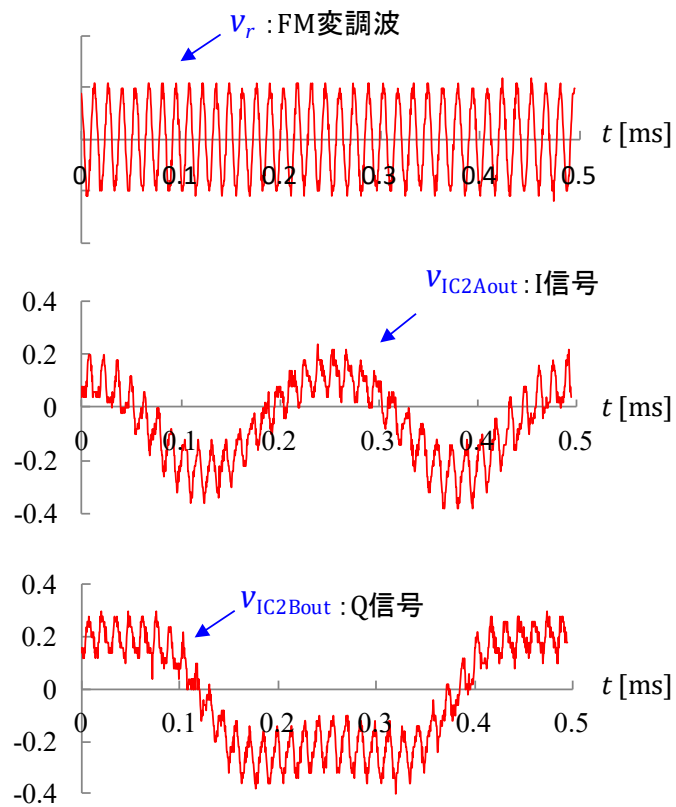


図 A.4 直交ミキサ方式により得られた I 信号と Q 信号(FM 受信の場合)

著者 古橋 武
 名古屋大学名誉教授 (令和 2 年 4 月より)
 Email: furuhashi.takeshi

後ろに @gmail.com を付けてください.