

第 1 2 章 ストレート方式ソフトウェア ラジオ

本稿掲載の Web ページ

http://mybook-pub-site.sakura.ne.jp/Radio_note/index.html

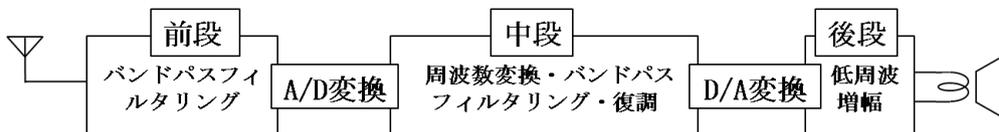
目次

第 12 章 ストレート方式ソフトウェアラジオ	2
12.1 ソフトウェアラジオとは	2
12.2 ストレート方式ソフトウェアラジオ	3
12.2.1 回路方式	3
12.2.2 組み立て	5
12.2.3 ソフトウェア	10
12.2.4 調整	11

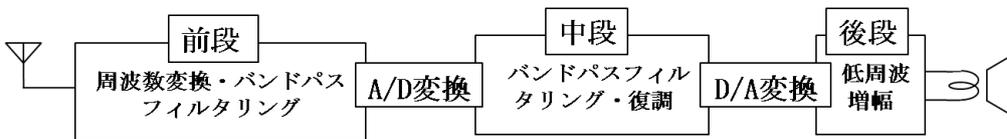
第12章

ストレート方式ソフトウェアラジオ

12.1 ソフトウェアラジオとは



(a) ソフトウェアにより周波数変換・復調を行う方式



(b) ソフトウェアにより復調を行う方式

図 12.1: ソフトウェアラジオの構成

ソフトウェアラジオなる耳新しい言葉が聞こえてくる。インターネットで検索すればたくさんのページがリストアップされる。筆者の興味を引いたページはAM放送用のソフトウェアラジオのページである。興味がわいた理由の第一はなによりPICマイコンでラジオが作れそうであったこと、第二はブレッドボードで構成できそうであったこと、そして、第三は秋月などのネットショップで容易に入手可能な部品のみで構成できそうであったことである。実際、全て期待通りの結果となった。平成21年8月の時点では部品の全てをネットショップで購入できた。

ソフトウェアラジオ (SDR: Software Defined Radio) とは、「ハードウェアで構成されていた要素がソフトウェアにより記述・置き換えられることが可能な無線通信もしくはその技術」と定義される。本稿ではラジオを受信機という狭い意味で用いている。本稿

のソフトウェアラジオは、復調回路より前段のいずれかの段階で、アナログのラジオ信号を A/D 変換器によりデジタル信号に変換してパソコン/マイコンに取り込み、デジタル信号処理により復調処理を行う受信機とする。基本構成を図 12.1 に示す。(a) は高周波信号を直接 A/D 変換した後、プログラム実行により周波数変換、復調を行う構成である。(b) は周波数変換を前段で行い、その後に A/D 変換、プログラム実行による復調を行う構成である。高速の A/D 変換器があれば (a) の方式により高い機能（選択度、音質）を持つラジオを作ることができる。最新 (2009 年 10 月時点) のソフトウェアラジオでは、14bit, 80Msps の A/D 変換器により、10kHz~30MHz の放送帯域をカバーするものが販売されている。本稿では (a),(b) のそれぞれの方式により中波帯 AM 用ソフトウェアラジオをブレッドボード上に構成する例を紹介する。

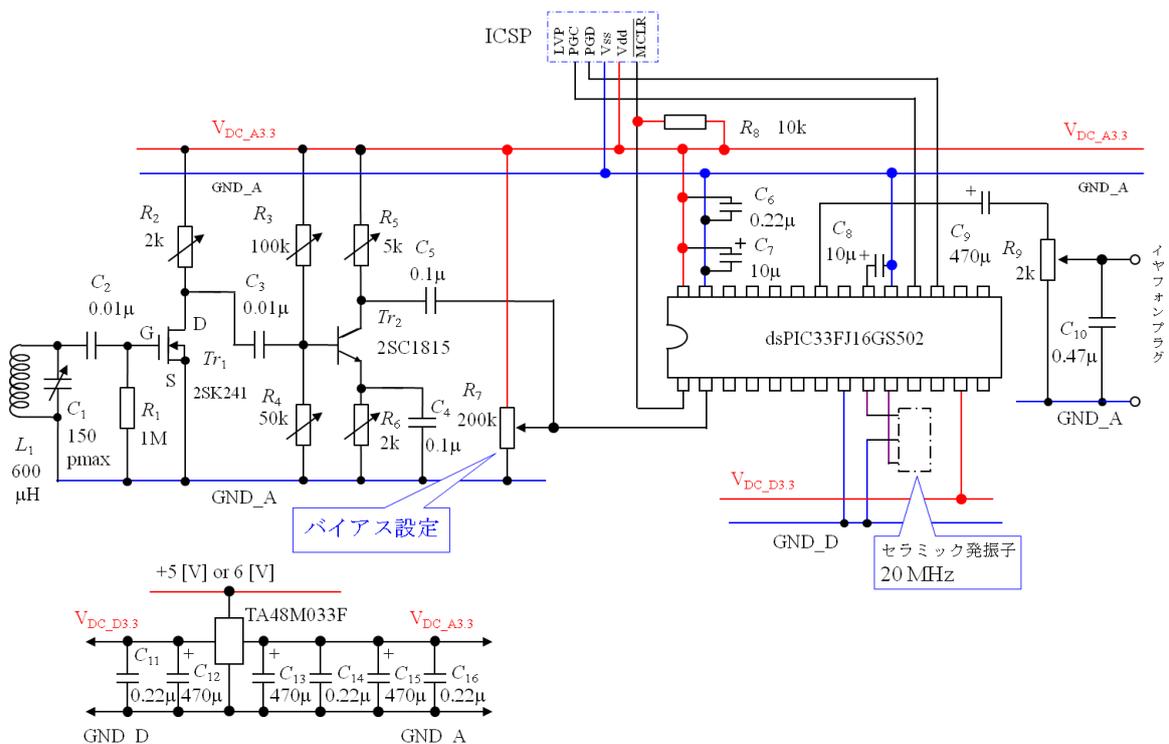


図 12.2: ストレート方式ソフトウェアラジオ

12.2 ストレート方式ソフトウェアラジオ

12.2.1 回路方式

平成 21 年 8 月の時点で、図 12.1(a) のラジオを構成でき、しかもブレッドボードに挿入できるマイコンを探したところ、Microchip 社の PIC33FJ16GS502 を見つけた。ただ

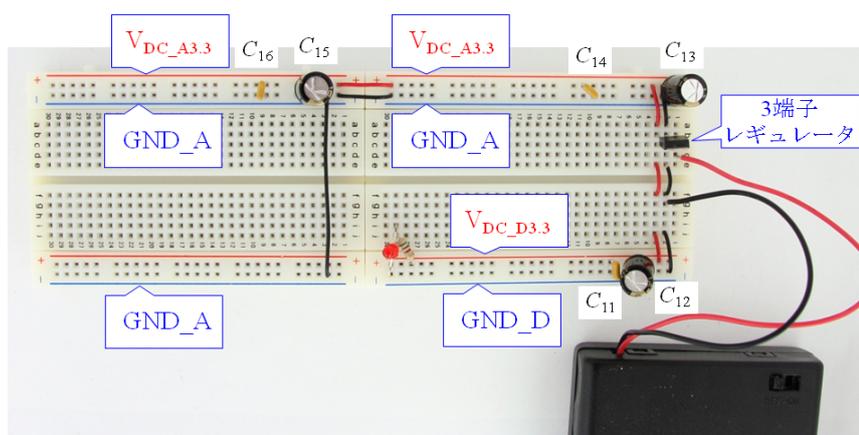
し、周波数変換、バンドパスフィルタリングは割愛して、復調のみをマイコンで行うこととした。このマイコンは2 [MSPS](Sampling Per Second) の10ビットA/D変換器を持つ。音声出力には高速PWM(Pulse Width Modulation) 信号を利用できる。処理速度は40[MIPS](Million Instructions Per Second) である。2 [MSPS] のA/D変換を実行した場合、1サンプリング周期の間に20命令を実行できるが、A/D変換結果の読み込み、復調、PWM出力を実行するには、20命令では足りない。そこで、マイコン内部のPLL(Phase Locked Loop) 出力周波数FOSCを100 [MHz] (マニュアルの上限は80 [MHz] であるので無理な使い方である。) に設定し、(FOSC/2 =) 50 [MIPS] で強引に動かしてみた。この処理速度で、A/D変換結果の読み込み、復調、PWM出力を実行できるサンプリング周波数の上限は1.85MHzであった。1サンプリング周期の間におよそ27命令を実行できる設定とした。

図12.2はPIC33FJ16GS502を用いたソフトウェアラジオである。4.3節のFET増幅回路+2SC1815高周波増幅回路の出力をマイコンに取り込み、復調、低周波増幅を行う構成である。なにはともあれ定義上ソフトウェアラジオである。このラジオを本稿では**ストレート方式ソフトウェアラジオと呼ぶ**。

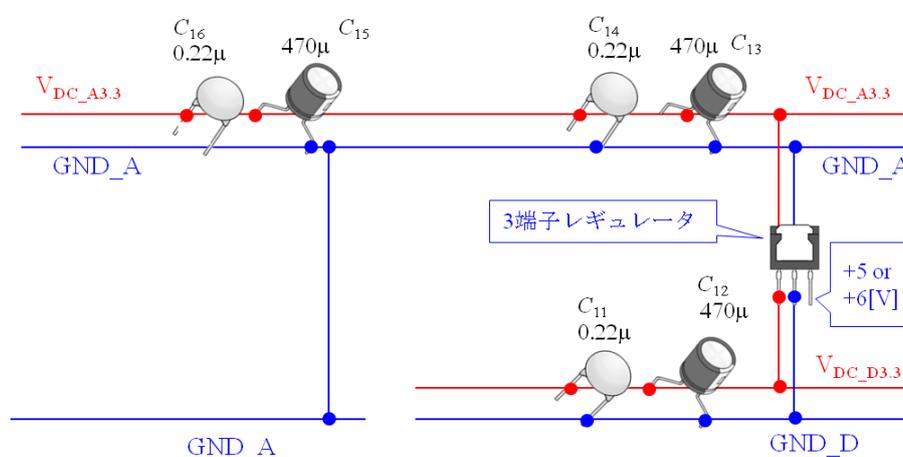
このラジオにより、NHK名古屋(729 [kHz])、NHK教育(909 [kHz])を聴くことができる。このソフトウェアラジオは、とにかくプログラム実行によりラジオが聴ける、という興味を満たしてくれる。なお、CBCラジオ(1053 [kHz])、東海ラジオ(1332 [kHz])も聴くことはできる。13.2節**エイリアスノイズ**で詳述するように、サンプリング周波数(本ストレート方式ソフトウェアラジオでは1.85[MHz])の半分の周波数(925 [kHz])、**ナイキスト周波数**と呼ばれる。)より高い周波数の信号は「折り返して」マイコンに入力される。

図12.2において、 $V_{DC_A3.3}$ はアナログ回路の+3.3[V]電源ラインであり、 GND_A はアナログ回路のグラウンドラインである。デジタル回路の+3.3[V]電源ラインとグラウンドラインはそれぞれ $V_{DC_D3.3}$ 、 GND_D と表して、アナログ回路の電源ラインと区別してある。図12.3はブレッドボードに設定した電源ラインを示す。ブレッドボードはEIC-801を2枚つなげて用いている。デジタル回路の電源ラインを右下の横2行に限定することで、デジタル回路で発生するノイズがアナログ回路に混入するのを抑える効果がある..

図12.2の中央上部のICSPと記した箱は、PICマイコンへの書き込みをブレッドボード上で可能とするための**ICSP (In Circuit Serial Programming)** コネクタである。ICSPは6つの電極からなる。箱の中には対応する電極の名称を記してある。dsPIC33FJ16GS502のデータシートによると、マイコンにおいてMCLRは1番ピン、PGC(ICSPCLK)は18番ピン、PGD(ICSPDAT)は17番ピンである。なお、データシートはマイクロチップテクノロジー(株)のホームページ<http://www.microchip.co.jp/>において、製品情報 → 16ビット PIC MCUs & dsPIC DSCs → Products → dsPIC33F → dsPIC33FJ16GS502



(a) 写真



(b) 立体配線図

図 12.3: ストレート方式ソフトウェアラジオの電源配線

とたどることでダウンロードできる。

(PIC マイコンの使い方はデータシートを読むことができれば分かる。しかし、PIC マイコンのことがよく分かっていないとデータシートが読めない。マイコンの初学者にはとてもハードルが高い。とくにネット上に使用例の報告の少ない dsPIC33F タイプのマイコンの場合はなおさらである。筆者には使いこなしているという自信はない。)

12.2.2 組み立て

図 12.4 はブレッドボード上に組み立てたストレート方式ソフトウェアラジオの写真である。電池ボックス、イヤホンプラグは外してある。

図 12.5 は立体配線図である。配線の詳細はこの立体配線図で確かめられたい。セラミック発振子は端子を加工しないと、そのままではブレッドボードに挿せない。図 12.6(a) は

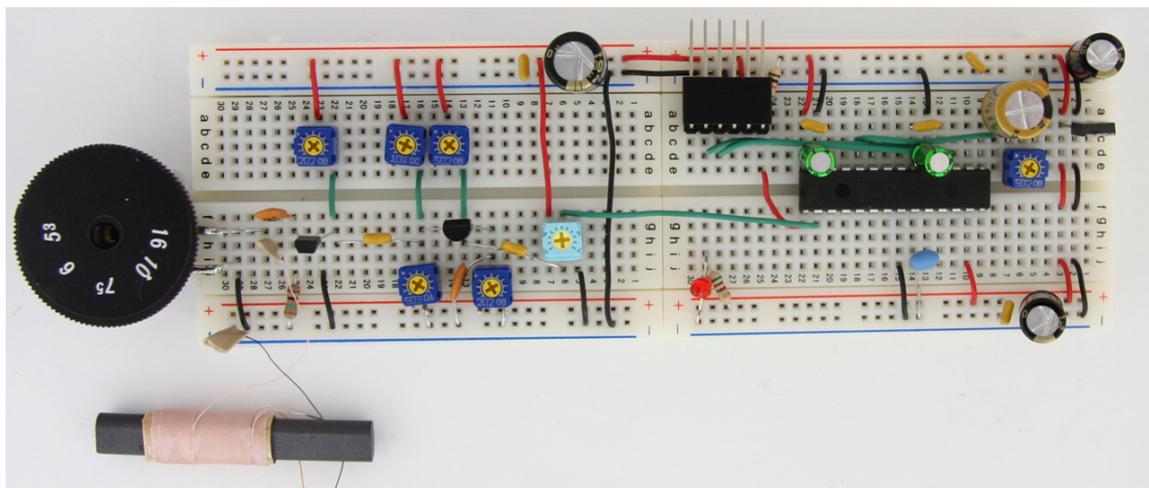


図 12.4: ストレート方式ソフトウェアラジオの写真

市販のセラミック発振子の写真である。これを同図 (b) のように加工する。左は発振子の正面であり、右は側面である。両側の端子をまっすぐに伸ばし、真ん中の端子は写真右のように 90 折り曲げて、端子の先にスズメッキ線をハンダづけして延長してある。この加工により、図 12.4 の様に発振子を直接ブレッドボードに挿入できる。

図 12.7 は 3 端子レギュレータの外観写真である。マイコン dsPIC33FJ16GS502 は電源電圧が 3.0~3.6 [V] の範囲で 40 [MIPS] にて動作する。最大印加可能電圧は 4.0 [V] である。そこで、3 端子レギュレータ (TA48M033F) により 3.3 [V] の安定化電圧を得ている。このレギュレータの定格出力電流は 0.5 [A] である。出力電圧 3.3 [V] の安定性は、入出力間電圧差が 0.7 [V] 以上あれば定格電流 0.5 [A] 出力時でも保証される。本ラジオにおいては、3 端子レギュレータの入力電圧 (ラジオの電源電圧) は 5 [V] (充電電池 4 本) もしくは 6 [V] (乾電池 4 本) であり、それぞれ電圧差が 1.7 [V], 2.7 [V] ある。

図 12.2 に示した ICSP 端子はマイコンへのプログラム書き込みを可能とするための端子である。図 12.8 は Microchip 社製の PICkit3 (In Circuit Debugger) により ICSP コネクタを通してマイコンにプログラムを書き込む様子を示す。ICSP コネクタ製作の様子を図 12.9, 12.10 に示す。図 12.9 のように 6 個の穴に ICSP の電極 AUG, ICSPCLK, ICSPDAT, Vss, Vdd, $\overline{\text{MCLR}}$ を割り当てている。LVP 端子は開放である。Vss はグランド、Vdd は +3.3[V] 電源を接続する。ここにはデジタル電源ラインを接続する方がノイズの観点からは好ましいが、プログラミング、デバッグ終了後は PICkit3 を取り外してラジオを聴くことを前提に、アナログ電源ラインに接続してある。図 12.10 のように、この 6 個の穴に 6 ピンのピンヘッダを差し込み、そのピンヘッダにピンソケットを差し込むことで ICSP コネクタを作ることができる。

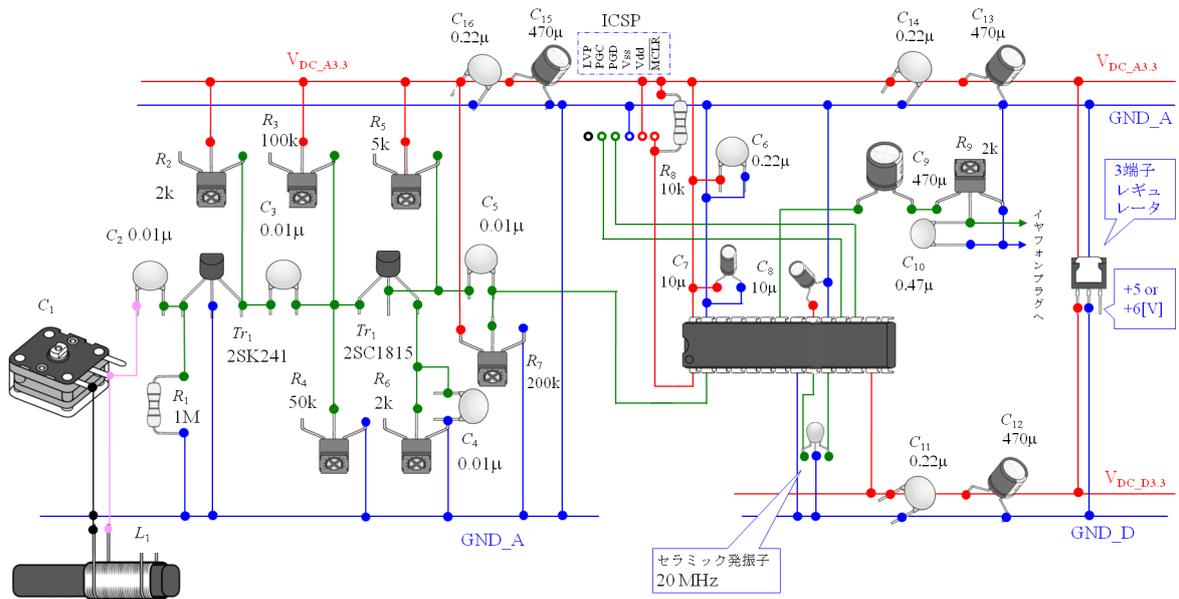


図 12.5: ストレート方式ソフトウェアラジオの立体配線図



(a) 購入時の外観

(b) 端子の加工の様子

図 12.6: セラミック発振子 (20 [MHz])

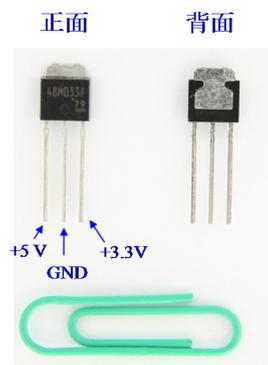


図 12.7: 3 端子レギュレータ (3.3 [V] 出力)

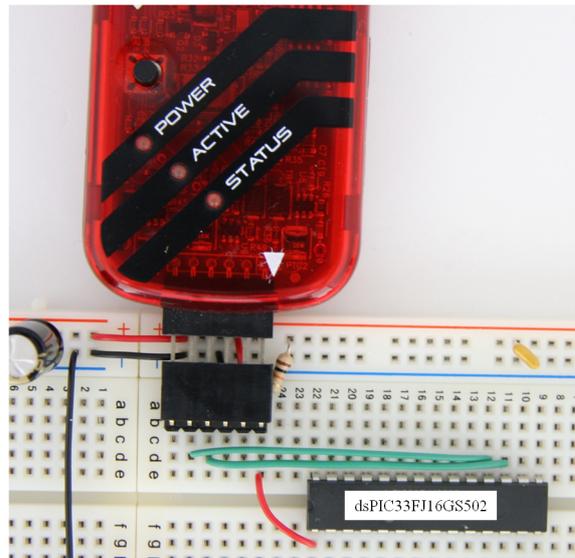


図 12.8: ICSP コネクタを通した PICKIT3 による書き込み

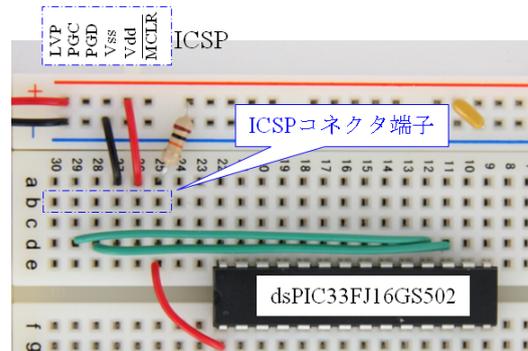
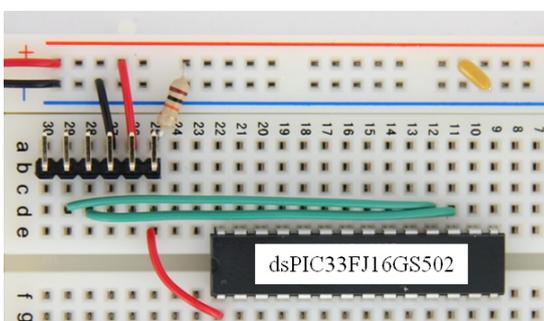
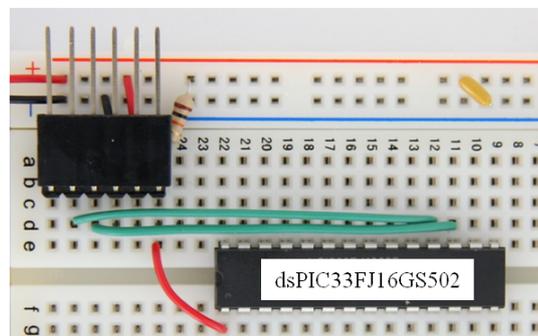


図 12.9: ICSP コネクタの製作



(a) ピンヘッダ挿入



(b) ピンソケット装着

図 12.10: ICSP コネクタの製作 (ピンヘッダ・ソケット)

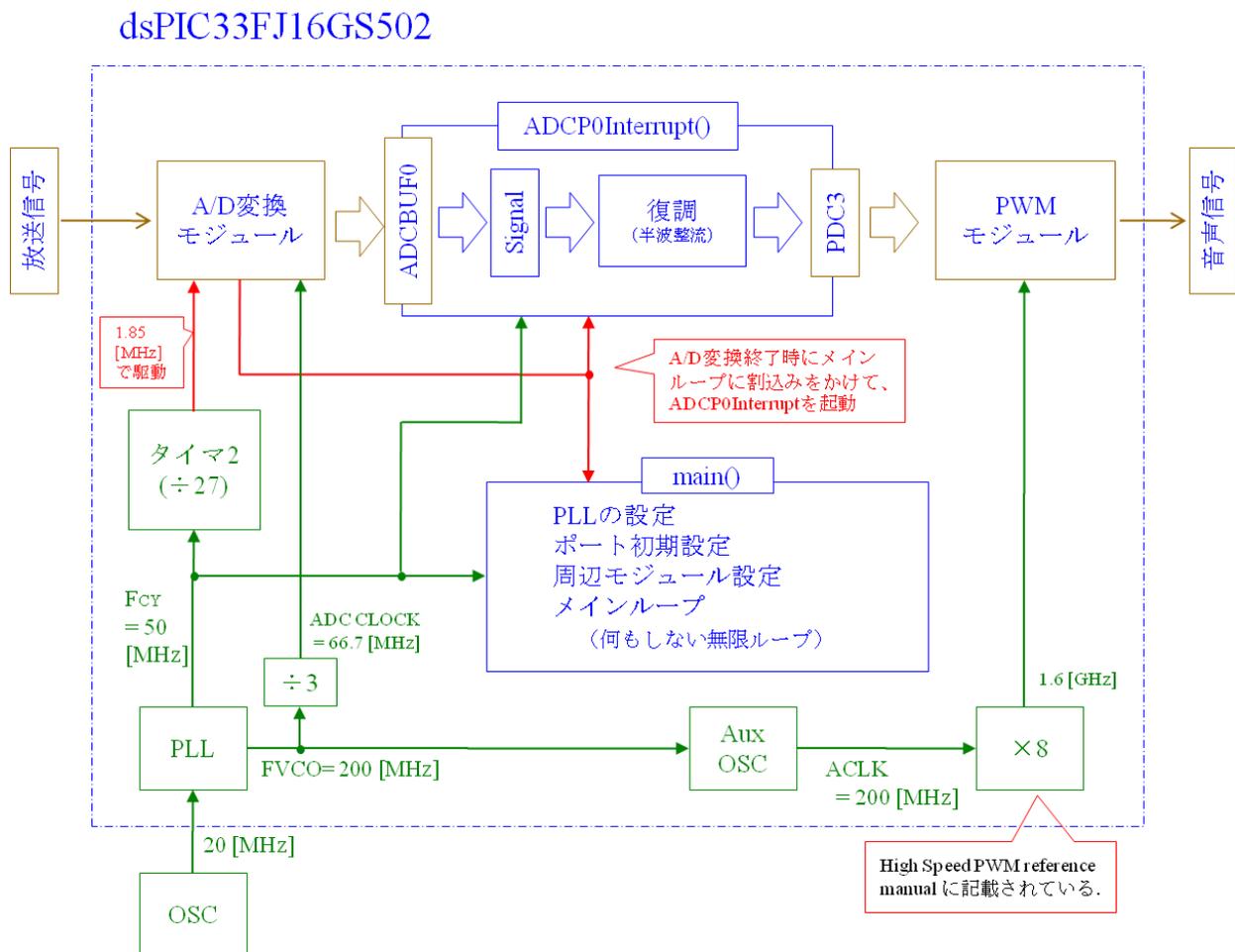


図 12.11: ストレート方式ソフトウェアラジオのマイコン内部の構成

12.2.3 ソフトウェア

マイコンのプログラムを本稿と同じ Web ページ上にアップする。図 12.11 はプログラムで設定しているマイコン内部の構成を示す。プログラムは main 関数と ADCP0Interrupt 関数の二つの重要な関数からなる。main 関数は PLL(Phase Locked Loop), 入出力ポート(マイコンの入出力端子), 周辺モジュール(補助オシレータ, タイマ, A/D 変換, PWM の各モジュール)の初期設定と(何もしない)無限ループを実行する。ADCP0Interrupt 関数は, A/D 変換モジュールの変換終了割り込みにより起動され, A/D 変換結果の読み込み, 復調, PWM 指令値の出力を実行する。

PLL 設定では, 図 12.6 のセラミック発振子の発信周波数 20 [MHz] を入力として, $FVCO = 200$ [MHz] と $Fcy = 50$ [MHz] としている。FVCO は補助オシレータ (Aux OSC) と A/D 変換モジュールで利用され, Fcy はタイマ 2 およびソフトウェア実行において利用される。

入出力ポート (I/O port) 設定では, RA0~RA4, RB0~RB15 のうち, 2 番ピンに割り当てられている RA0 を入力設定とし, 他のポートは出力設定としている。図 12.2 より, 2 番ピンは高周波増幅回路からの放送信号の入力端子である。後述の A/D 変換モジュール設定において, この端子をアナログ入力に設定している。

周辺モジュール設定では補助オシレータ, タイマ, A/D 変換, PWM の各モジュールを設定している。

補助オシレータ (Aux OSC) モジュール設定では, $FVCO = 200$ [MHz] を利用する設定としている。High Speed ADC reference manual (Microchip 社の Web ページからダウンロード可)によると, Aux OSC の出力 $ACLK = 200$ MHz は 8 倍されて PWM モジュールで利用されることが分かる。PWM モジュールのクロックは 1.6 [GHz] となる。

タイマモジュール設定では, タイマ 2 を利用する設定としている。Fcy = 50 [MHz] を 27 分周して, 1.85 [MHz] を得ている。

A/D 変換モジュール設定では, クロックに FVCO を 3 分周して利用し, タイマ 2 を A/D 変換開始のトリガとし, 2 番ピンの AN0 をアナログ入力に設定している。A/D 変換終了時に main 関数の(何もしていない)無限ループに割り込みをかけ, ADCP0Interrupt 関数を起動する設定としている。データは符号なし整数型に設定している。A/D 変換の参照電圧は AVSS(27 番ピン)と AVDD(28 番ピン)である。図 12.2 において AVSS には 0 [V], AVDD に 3.3 [V] が印加されるので, 10 ビット A/D 変換はこの 0 ~ 3.3 [V] の電圧範囲を 0000 0000 0000 0000 ~ 0000 0011 1111 1111 に変換する。変換電圧単位は 3.3 [V]/1024 = 3.2 [mV] である。なお, ADC のクロックは $FVCO = 200$ [MHz] を 3 分周して 66.7 [MHz] で利用する設定としているが, データシートによると ADC クロック周期

(TAD) の最小値は 35.8 [ns] である。すなわち、A/D 変換結果を保証するクロック周波数の上限は約 28 [MHz] であるので、本設定は無理な使い方ではある。

PWM モジュール設定では、22 番ピンの PWM3L を PWM の出力ピンに指定し、PWM 周期を A/D 変換モジュールのサンプリング周期と一致する設定としている。

main 関数は、以上の初期設定を行った後に、(何もしない) 無限ループを実行し続ける。

A/D 変換モジュールはタイマ 2 により、1.85 [MHz] の周波数 (0.54 [μ s] の周期で) で起動される。変換終了時毎に main 関数に割り込みをかけ、ADCP0Interrupt 関数を起動する。また、変換結果をレジスタ ADCBUF0 に格納する。

ADCP0Interrupt 関数は、A/D 変換終了時に起動され、ADCBUF0 の値を変数 Signal に読み込む。この値は 10 ビットの符号なし整数値であるので、0~1024 の値をとる。100 以下の Signal を 0 とする半波整流により復調を行う。最後に、復調結果を PWM モジュールのデューティ比設定用レジスタ PDC3 に出力する。なお、入力の放送信号の 0 レベルを 100 に合わせるには、図 12.2 において抵抗 R_7 によりバイアスを設定すればよい。これにより、0 レベルより大きな正の半波が PWM モジュールに出力されることになる。

PWM モジュールは毎周期 (A/D 変換モジュールのサンプリング周期と一致) 更新される PDC3 の値に応じたデューティ比の PWM 信号を出力する。

12.2.4 調整

図 12.12 は各部の抵抗値と直流電圧の調整例である。これらの値は厳密である必要はなく、この辺りとなるように各抵抗値を調整すればよい。音量調節用の可変抵抗器 (ポリウム) R9 のつまみを真ん中辺りとし、イヤフォンをつなぎ、選局ダイヤルを回せばラジオ放送が聞こえてくるはずである。図??の写真の矢印の位置に各抵抗値を合わせることもよい。いったん音が聞こえれば、後はそれぞれの抵抗値を音が大きくなる方へと少しずつ変えていくことでラジオの感度を上げることができる。

表 12.1 は本章において初めて購入する電子部品と PICkit3 の購入先を示す。その他の電子部品については第 1 章の表 1.1.1 を参照されたい。

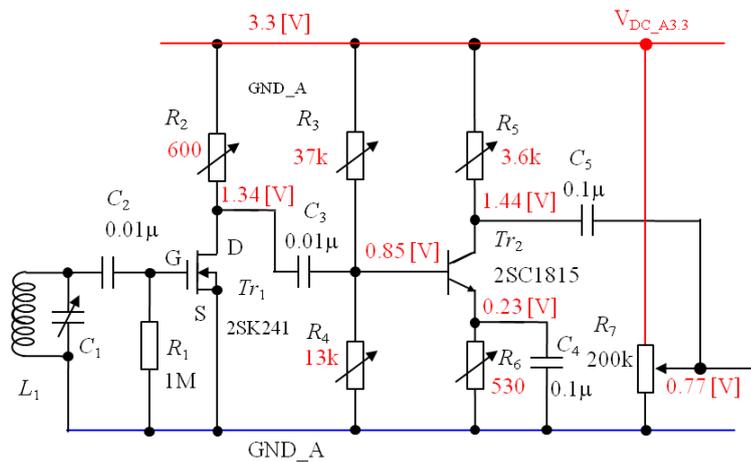


図 12.12: ストレート方式ソフトウェアラジオの調整

表 12.1: 電子部品購入先

部品	型式・定格	単価(円)	数量	購入先
マイコン	dsPIC33FJ16GS502-I/SP	505	1	Digi-Key http://jp.digikey.com/
セラミック発振子	20 MHz	40	1	秋月電子通商 http://akizukidenshi.com/
3端子レギュレータ	TA48M033F 3.3 V, 500 mA	100	2	同上
ブレッドボード	EIC-801	250	2	同上
ピンヘッダ	L型 1×6 (6P)	10	1	同上
ピンソケット	1×6 (6P)	30	1	同上
インサーキット・デバッグ	PICkit3	3,900	1	同上

索引

- 3 端子レギュレータ, 6
- A/D 変換器, 3
- A/D 変換モジュール, 11
- A/D 変換モジュール設定, 10
- ADCP0Interrupt 関数, 11
- FOSC, 4
- ICSP, 4
- main 関数, 11
- PIC33FJ16GS502, 3
- PICkit3, 6
- PLL, 4
- PLL 設定, 10
- PWM 信号, 4
- PWM モジュール, 11
- PWM モジュール設定, 11
- SDR, 2
- エイリアスノイズ, 4
- サンプリング周波数, 4
- 周辺モジュール設定, 10
- 処理速度, 4
- ストレート方式ソフトウェアラジオ, 4
- セラミック発信子, 6
- ソフトウェアラジオ, 2
- タイマモジュール設定, 10
- ナイキスト周波数, 4
- 入出力ポート, 10
- 補助オシレータモジュール設定, 10

2010年10月

2013年5月改訂

著者

古橋武

名古屋大学工学研究科情報・通信工学専攻

furuhashi at nuee.nagoya-u.ac.jp