

世界に一つだけ!

トランジスタ技術増刊

トランジスタ技術

エレキ工房

No. 1

特集

タッチ・スペアナ付き FPGAラジオ 放送スタジオの空気が伝わってくる

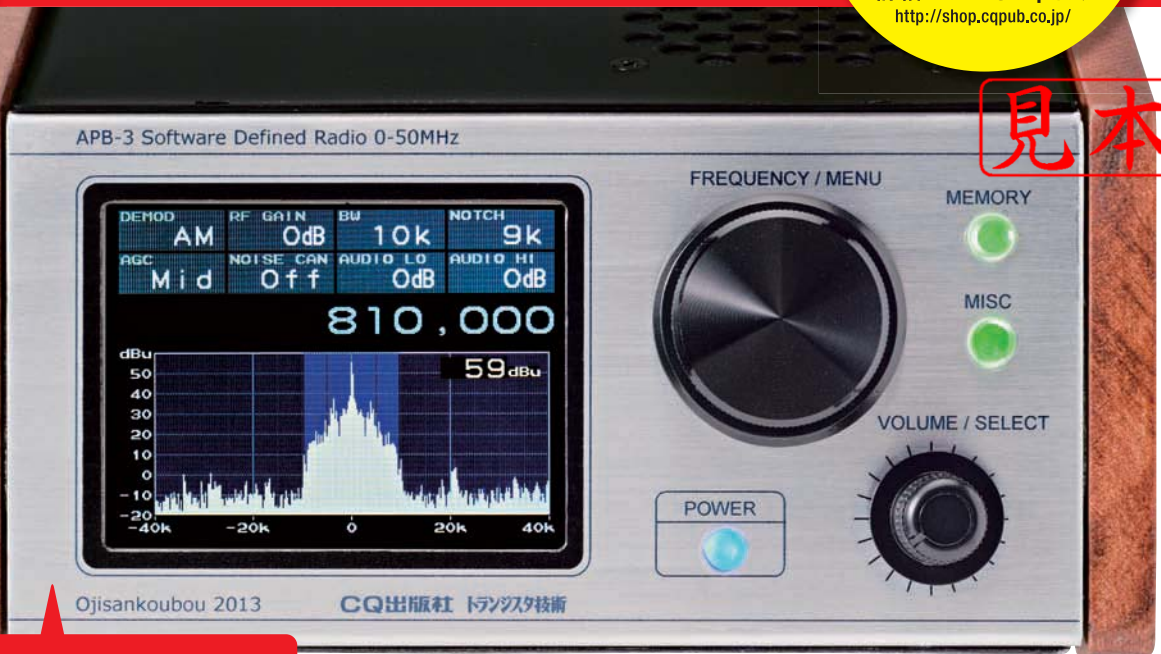
限定生産

特集で製作した
FPGAラジオ基板
を頒布中!

詳細はWebShopまで
<http://shop.cqpub.co.jp/>

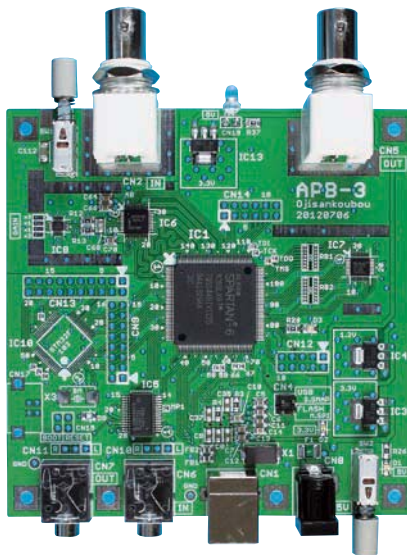
見本

※写真は未実装の機能の表示を含む



高音質!
アマチュア無線も!

項目	スペック
受信帯域	0~50MHz
A-Dコンバータ	16ビット, 100Msps
通過帯域	2kHz ... 10kHz 可変
受信モード	AM, SSB
感度@S/N=10dB	1.1μV
局部発振	DDS (0.023Hzステップ 0Hz~50MHz)
ディスプレイ	タッチ・スクリーン付き LCD (3.2インチ)
スペクトラム表示	受信波 (80kHzスパン), オーディオ帯 (10kHz)
出力信号	オーディオ信号, I/Q信号



特集プラス



FPGA FMチューナ

- 受信帯域: 76M~90MHz
- S/N: 77dB (65dBf)
- サンプリング周波数: 73.728MHz
- 高調波ひずみ率: 0.002%
- 出力: S/PDIF (48k~192kbps)+アナログ

限定生産
基板頒布中!

実験・製作

エネルギーで
約7年連続再生!
省エネAMラジオ





イントロダクション 0Hz～50MHzのすべてに
1Hz刻みで一発チューン！

FPGAで作る高音質 デジタル・ラジオ

小川 一朗 Ojsankoubou
Ichiro Ogawa

携帯電話やテレビなど、今ほとんどの受信機はソフトウェア・ラジオ (SDR) で作られています。アンテナ入力後にA-D変換され、各種デジタル信号処理を通して音声信号が得られます。

● スタンドアロンで動作するラジオ (図1)

特集で紹介するラジオは、市販品 (普通に購入できる価格帯で、スタンドアロンでスペクトラム表示できるラジオ受信機は市販されていない) にも負けない性能と操作性 (UI) を持っているのではないかと考えています。タッチ・パネルによるGUIは、主な設定項目は画面に出ているボタンをタッチするだけで変更可能なので直感的に操作でき、初めて使った方でもすぐに理解できます。操作例は図2、図4～図6を参照してください。

● デジタル信号処理の中身に踏み込んで解説

このラジオにはデジタル信号処理、ユーザ・インターフェースのプログラムなど多岐に渡る技術が使われています。本文ではこれら使われている技術についてできるだけ丁寧に説明していきます。アマチュアの自作でこの程度のもので作れるのだということ、そしてその技術はすぐそこにあるのです。一度読んだだけでは理解できないかもしれませんが、まずは興味があ

るところを何回も何回も読み返してみてください。いつかきっとアハと思うときがくるはずですよ。

それでは最後までお付き合いください。

1 ラジオの構成

ここで作るラジオは、いわゆるSDR (Software Defined Radio) です。ラジオの機能をソフトウェアで構成しているので、あとから新しい機能を追加するとか、動作中に特性を好みに応じて変更するといったことが簡単にできます。図3に各部の機能の概要と、第1章以降で説明している項番号を示しました。

また、デジタル信号処理ではアナログ回路では不可能な、振幅特性・群遅延特性がフラットなフィルタを作ることができ、いままでにない高音質のAM放送の受信や、妨害を軽減するVSB (Vestigial Side Band) モードの受信ができます。操作のようすや表示波形などを図2、図4～図6に掲載します。

コラム1 本器の心臓部APB-3基板

本特集で用いるAPB-3基板は、汎用実験基板として設計しています。2012年終わりから今年にかけて、『トランジスタ技術』誌上では測定器としての使い方を説明していますが、アナログ信号を出入力してデジタル信号処理するという用途なら何でもできてしまうといつてよいくらい応用範囲の広い基板です。

APB-3基板を設計する前に、筆者は同様な汎用実験基板としてAPB-1基板を作っていて、そのときにデジタル信号処理のラジオを作りました。APB-3基板はAPB-1をはるかに凌駕する性能をもった基板なので、この基板でラジオを作るとどの

程度の性能のもので作れるのか、ものすごく興味がありました。

しかし、APB-1のときとまったく同じものを作っても面白くありません。

そこで、FFTを使ったりリアルタイム・スペクトラム・アナライザ (受信する信号とその周辺のスペクトラムを表示) を搭載することにし、そのためグラフィックLCD (TFT LCD) を使うことにしました。また、ユーザ・インターフェース (UI: User Interface) を一新し、タッチ・パネルによる操作をメインにして使いやすく、わかりやすいものにしました。

LCDパネルの上のブロックは各種メニュー。タッチすると設定メニューが表示される

周波数を変更するダイヤル

周波数の表示。単位はHz。この文字の上をタッチすると、周波数のステップを変更できるメニューが出る

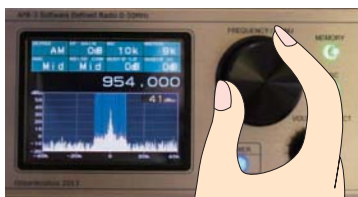
LCDの下半分は、本ラジオの最大の特徴であるスペクトラム表示。画面は横幅80kHzのスペンを表示している。横軸の数字付近をタッチすると、スペンを変更できるメニューが表示される

音量のボリュームを変更するダイヤル。LCD画面で各種メニューを表示した際にこのダイヤルで項目を変更できる



図1 製作したFPGA ラジオの外観

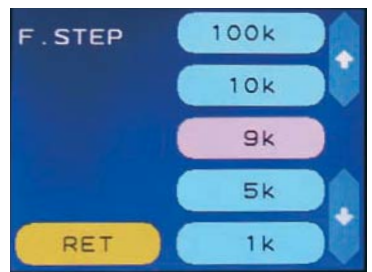
ケースに入れたようす。キットにケース類は含まれない。ケースの製作は第6章を参照。



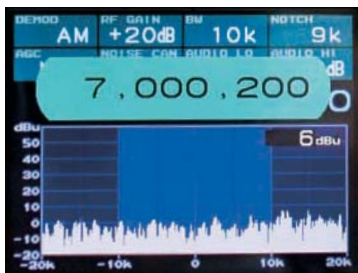
① ダイヤルを回して目的の周波数にする（電源投入直後は9kHzステップになっている）。RF GAINとNOISE CANは執筆時点では機能を実装していない



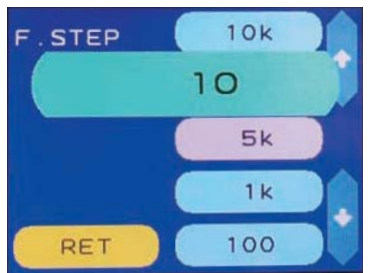
② LCD画面のスペクトラム表示上をタッチすると、そこがセンタにシフトして選局ができる



③ 画面中央に表示されている周波数をタッチすると、ステップを変更できる（最小は1Hz、最大は1MHz）



④ 短波帯に移動したいときはステップ数を100kHzなどに変更し、例えば7MHzまで一気に移動



⑤ そのあとは100Hzや10Hzなどのステップに変更



⑥ ゆっくりチューニングする

図2 操作例：周波数を変える

デジタルだからアナログ・デバイス特有の非線形や温度変化による性能劣化から解放される。

アンテナからの信号をA-D変換してから音声出力するまで、すべてデジタルでの信号処理になっているので特性が一定しており、誰が作っても同じ性能が無調整で得られます。

■ ラジオの各ブロックの概要

A-D変換した信号をデジタル信号処理して音声信号にしているのがFPGAで、このラジオの中心部分です。FPGAで実装しているラジオの信号処理は、

- ① 希望周波数を抜き出すフィルタ (詳しい解説は第2章)
- ② 変調信号を音声にする復調 (詳しい解説は第3章)

に大きく分けられます。

- ① FPGA に入った信号は、DDS (Direct Digital

Synthesizer) で作った2相信号で周波数変換して、ゼロ周波数付近にします。周波数変換された信号は、いわゆるI、Qの複素信号で、ゼロを中心に正と負の周波数のスペクトラム成分があります。

その次に、CIC (Cascaded Integrator Comb: カスケード積分くし型) フィルタで1/64の1.56MHzにサンプリング周波数を落とした後、FIR POLY フィルタでさらに98kHzにサンプリング周波数を落とします。ここの信号をFFTしてスペクトラム・アナライザ表示をしています。復調するにはまだサンプリング周波数が高すぎるので、さらにFIRフィルタを通して24kHzにサンプリング周波数を落とします。最初100MHzだったサンプリング周波数を24kHzまで落とすと同時に、希望周波数だけを抜き出すフィルタ処理をしてきたわけです (第2章 図2-3も参照)。

トラ技USB-FPGA信号キットAPB-3TGKIT

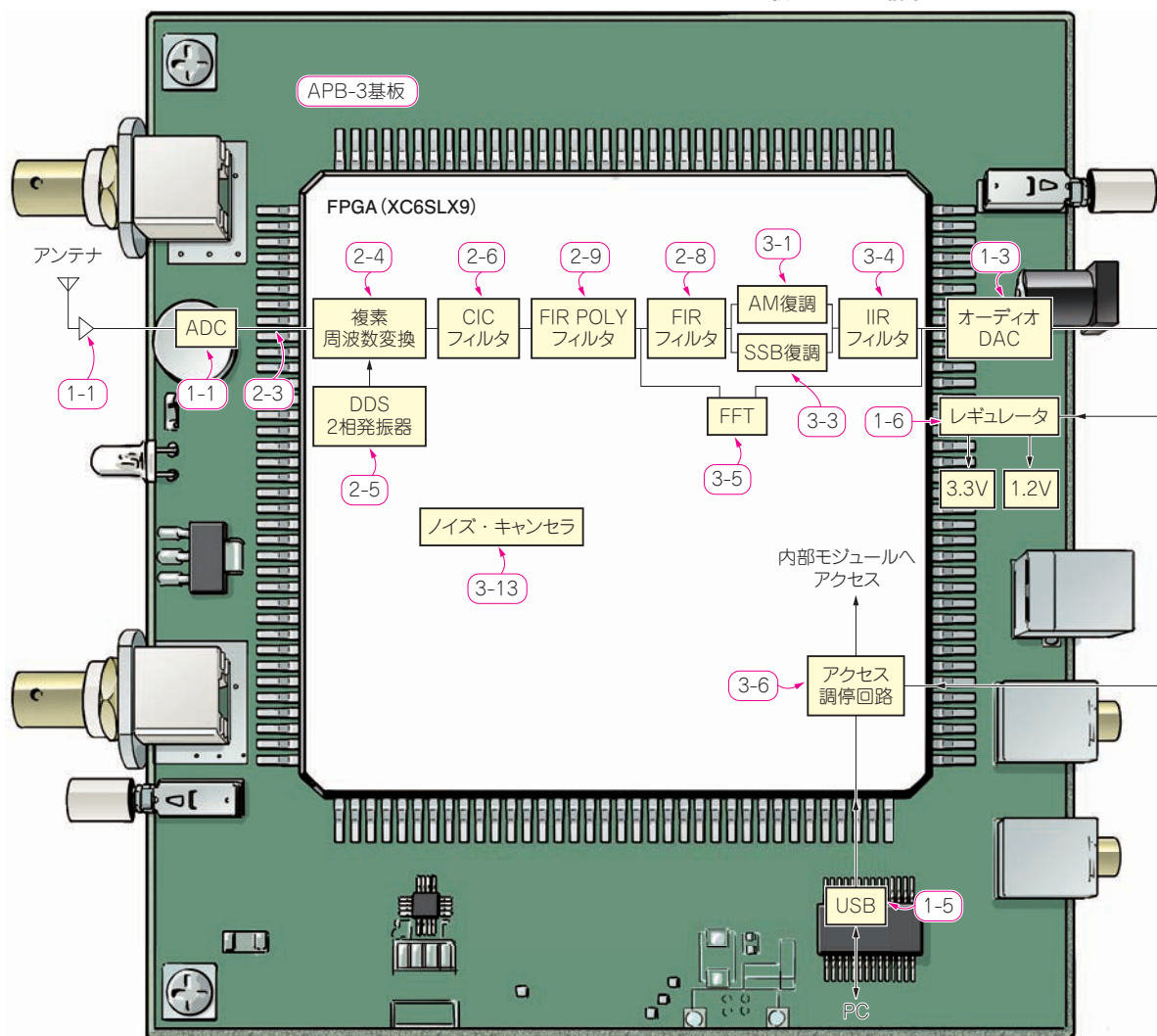


図3 FPGAで作る高音質デジタル・ラジオの構成と各要素技術の説明場所 (【例】「3-5」…第3章の5項で説明している)

② サンプリング周波数が24kHzになった変調信号を、復調して音声に戻します。このラジオではAMとSSBを復調できます。AMは、CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) を使った絶対値計算で振幅を取り出して復調します。SSBはヒルベルト・フィルタを使って位相を90°ずらした信号を作り、加減算して復調します[いわゆるPSN (Phase Shift Net work)と同じ]。

復調した音声信号は、オーディオDACでアナログ音声になります。アンプ付きスピーカやヘッドホンでラジオ放送を聴くことができます。

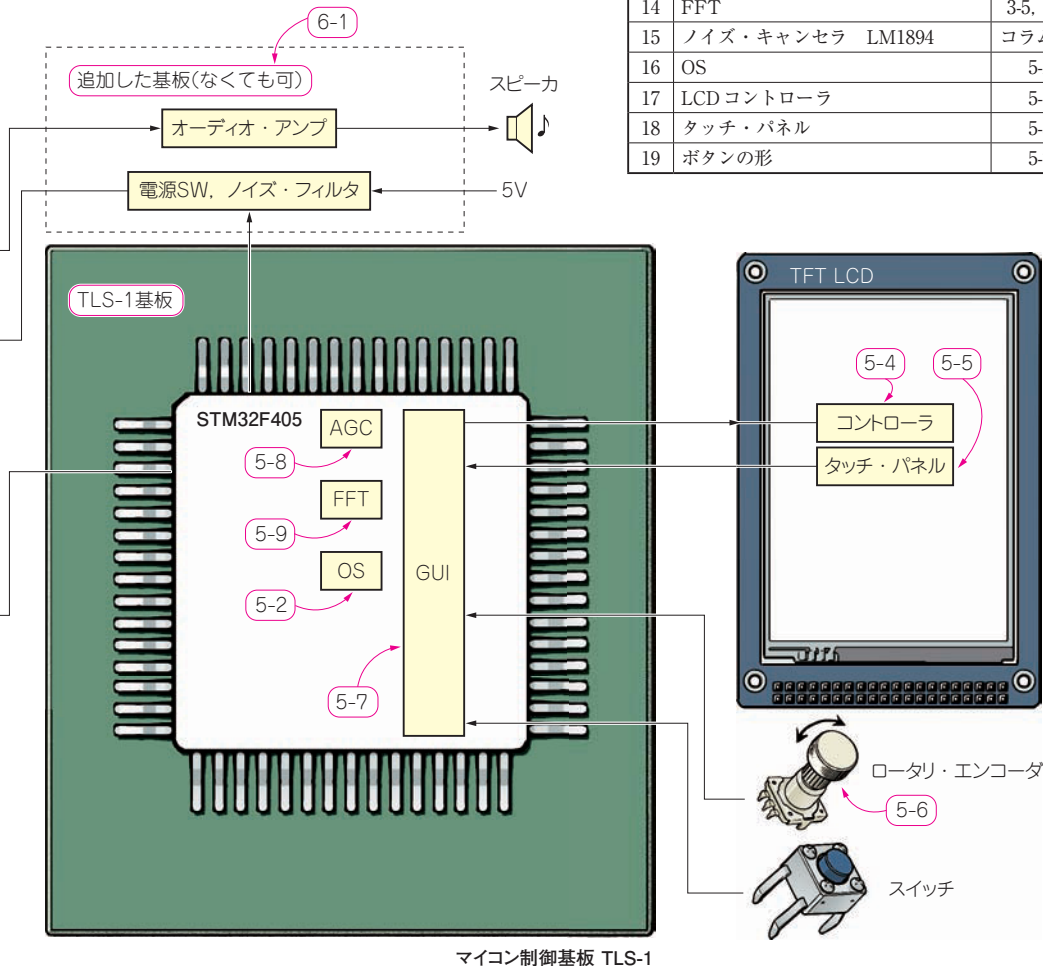
2 ユーザ・インターフェース部分 (詳しい解説や回路は第4章と第5章)

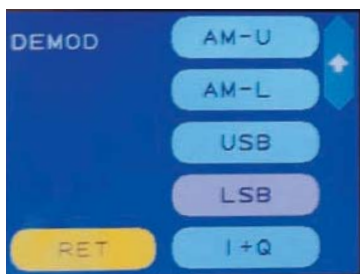
ユーザ・インターフェースを担当しているのがマイコンSTM32F405です。このマイコンはCortex-M4で、浮動小数点演算器を内蔵している高性能なものです。TFT LCDやタッチ・パネル、ロータリ・エンコーダ、

スイッチ類などを制御して、ラジオ全体のGUIを構築します。ソフトウェアは簡易OS上で動いていて、GUIのほかAGC (Automatic Gain Control) やRF信号のFFTもこのマイコンで実行しています。

表1 FPGA デジタル・ラジオの要素技術マップと解説のページ

	要素技術	章, 項	ページ
1	A-D変換器 (ADC)	1-1	10
2	RFアンプ	1-1	10
3	ADC→FPGA	2-3	26
4	周波数変換	2-5	28
5	DDS	2-6	28
6	CICフィルタ	2-7	31
7	FIRフィルタ	2-9	37
8	FIR POLYフィルタ	2-10	40
9	ゲイン設定, レベル検出, 飽和处理	2-8	34
10	AM復調	3-1	41
11	VSB復調	3-2	44
12	SSB復調	3-3	47
13	IIRフィルタ	3-4	48
14	FFT	3-5, 5-9	49, 76
15	ノイズ・キャンセラ LM1894	コラム3-6	52
16	OS	5-2	63
17	LCDコントローラ	5-4	66
18	タッチ・パネル	5-5	68
19	ボタンの形	5-7	74





① デフォルトはAM. パネルの左上をタッチ [AM, AM-U(VSB), AM-L(VSB), USB (SSB), LSB(SSB), I+Qが選べる]



② AM放送は両方の側帯があるので、どちらかにノイズが乗っている場合はノイズが乗っていないほうの側帯を選ぶことも可能



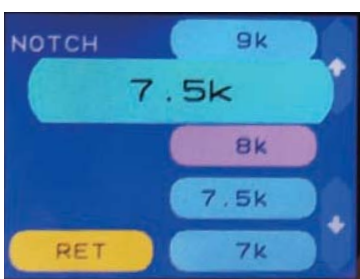
③ アマチュア無線ではSSB変調が使われるので、USBかLSBを選ぶ。スペクトラム表示の明るい青色は、復調範囲を示している

図4 操作例：復調モードを変える

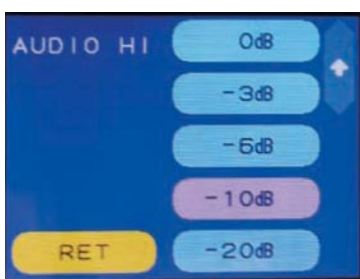
デジタルだから様々な変調方式に対応できる。本ラジオはAMとSSBを実装した。



① 画面下の数字をタッチし、オーディオのスペクトラムを表示



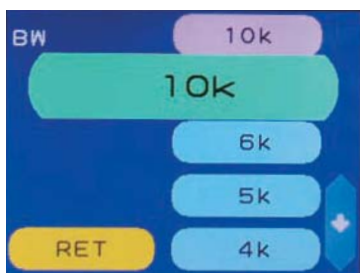
② 明らかなノイズに、ノッチ・フィルタを適用。スペクトラムを表示時にピーク・ノイズを目視しながらノッチ周波数を変更できる



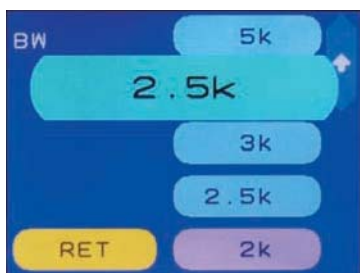
③ ヒス・ノイズを減らす高域のフィルタもある

図5 操作例：ノイズを減らして聞きやすく

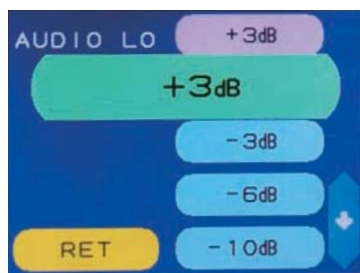
デジタルだから各種フィルタを多段にかけても品質が劣化しない。



① AM放送は10kHzで聞くと、送り出し側の品質の良さを初めて体感できる



② AM放送でノイズが多い場合は、狭い帯域でも音声は聞けるが3kHzを切ると急速に音質は低下する



③ 低音レベルをアップ/ダウンして好みの音質に調整できる

図6 操作例：バンド幅の変更

デジタルだから変調方式に合わせた適切な帯域を自由に実装できる。

LCD画面にはRFとオーディオ信号のスペクトラム表示ができ、スパンはRFが80kHz ~ 20kHz, オーディオが10kHz, 5kHzです。

受信している信号とその周辺のスペクトラム表示は、放送局の存在だけでなく家の中の電子機器からの妨害波もわかり、片サイド・バンドVSB受信でどちらのサイド・バンドを選べばよいのかが一目でわかり

ます。また、夜間にはラジオ放送が9kHzおきにびりりと並んでいるのが見えます。

音声スペクトラム表示にすると音楽に合わせてスペクトラムが上下し、環境ビデオみたいで、妨害波からのビートがあるときはその周波数もすぐわかります。ビート周波数のノッチをいれれば聴きやすくなります。

ラジオを実装するのに
十分な入出力をもつ!

第1章 ラジオのメイン処理はFPGAで行う

デジタル信号処理 ボードのハードウェア

小川 一朗 Ichiro Ogawa

本章では、ラジオの中で主要なデジタル信号処理を行う APB-3 基板のハードウェアについて簡単に説明します。APB-3 基板の表側を図 1-1 に、裏側を図 1-2 に示します。図 1-3 に示す機能が搭載されています。それぞれ機能ごとに説明していきます。回路は章末の図 1-4 に示します。

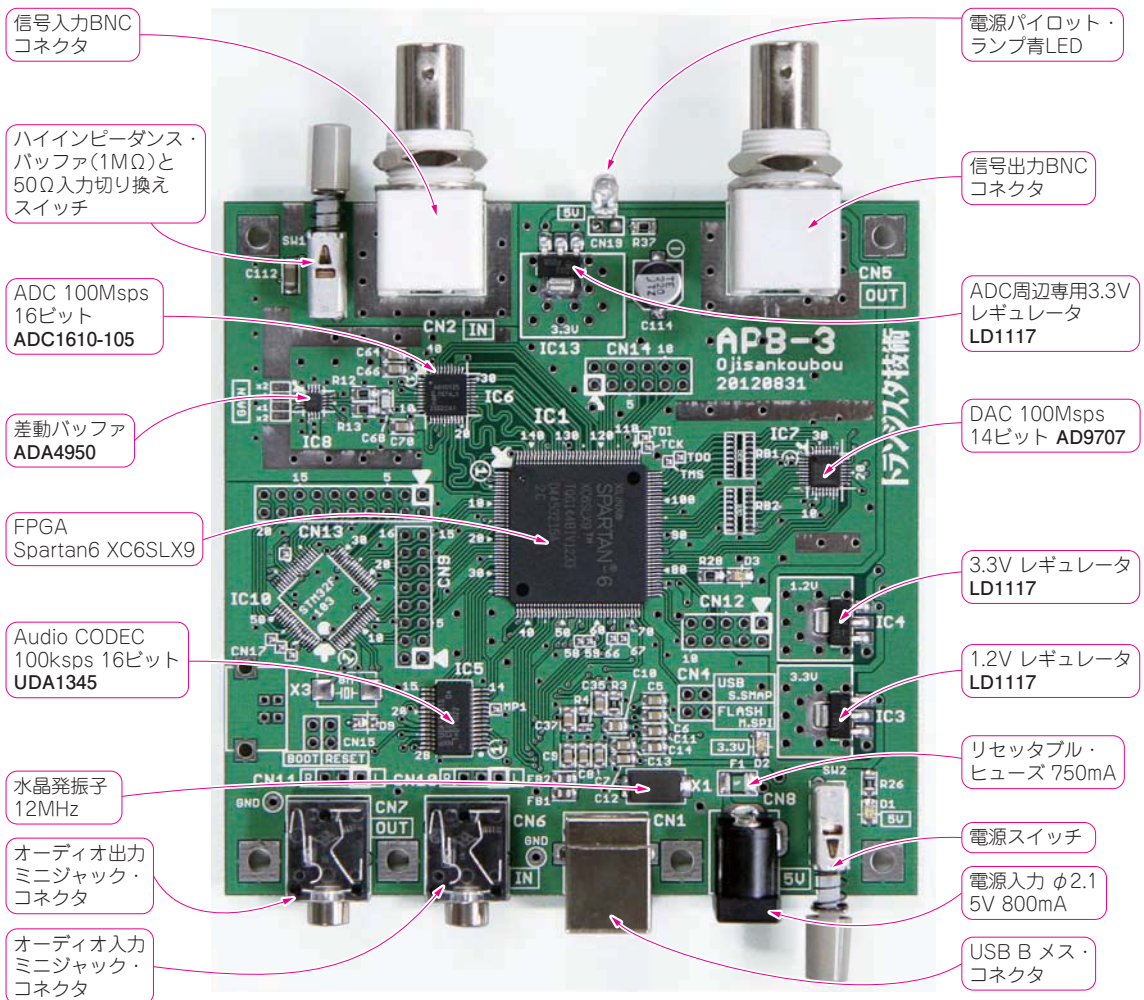


図 1-1 本器のデジタル信号処理ボード APB-3 基板の表面

FPGA はオリジナルの回路を実装できるデバイスだが、応用するためには入出力が必要。本基板は高速 A-D コンバータで自然界にあるアナログ・データを取り込み、D-A コンバータでオーディオ出力、高速 D-A コンバータで各種信号を出力することができるようになったコンパクトなボード。FPGA は 100MHz で動き、A-D コンバータも 100Msps と高速なので、ノイズ対策には注意を払って設計している。

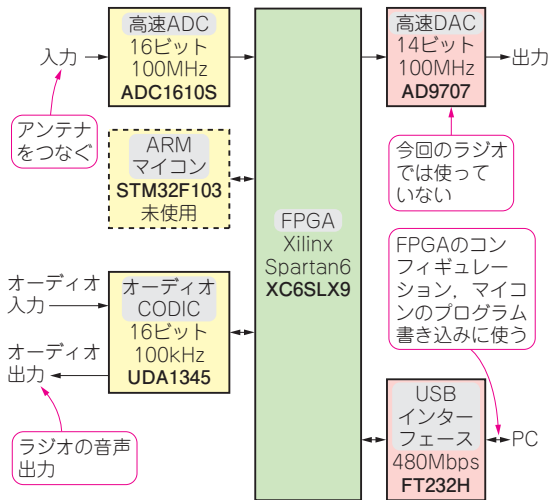


図1-3 APB-3基板のブロック図

APB-3にはマイコンCortex-M3を実装できるパターンがあるが、今回のラジオでは、マイコンCortex-M4をLCDやタッチ・パネルを制御するTLS-1側(第5章で解説)に実装・搭載して利用している。

1-1 16ビット、100Mbps高速A-D変換器(ADC1610S)を搭載

A-Dコンバータはラジオの受信性能を大きく左右します。ここで使ったIDT製のADC1610Sは、100Mpsps 16ビットのパイプライン型ADCです。アナログ入力信号の最大周波数は650MHzなので、アンダ・サンプリング(コラム1-1参照)して650MHzまでの信号を直接A-D変換することができます。筆者のような古い人間には夢のようなスペックですね。

● 入力にはフィルタを実装

アンテナからの信号は、アンチ・エイリアシング・フィルタに入ります。APB-3基板に載っているアンチ・エイリアシング・フィルタはカットオフ周波数50MHzのLPF(ローパス・フィルタ)で、ナイキスト周波数までの範囲の信号を扱えるようになっています。ここで作るラジオは中波から短波を対象とするのでこのままでOKですが、FMチューナを作る場合のようにアンダ・サンプリングする場合は、アンチ・エ

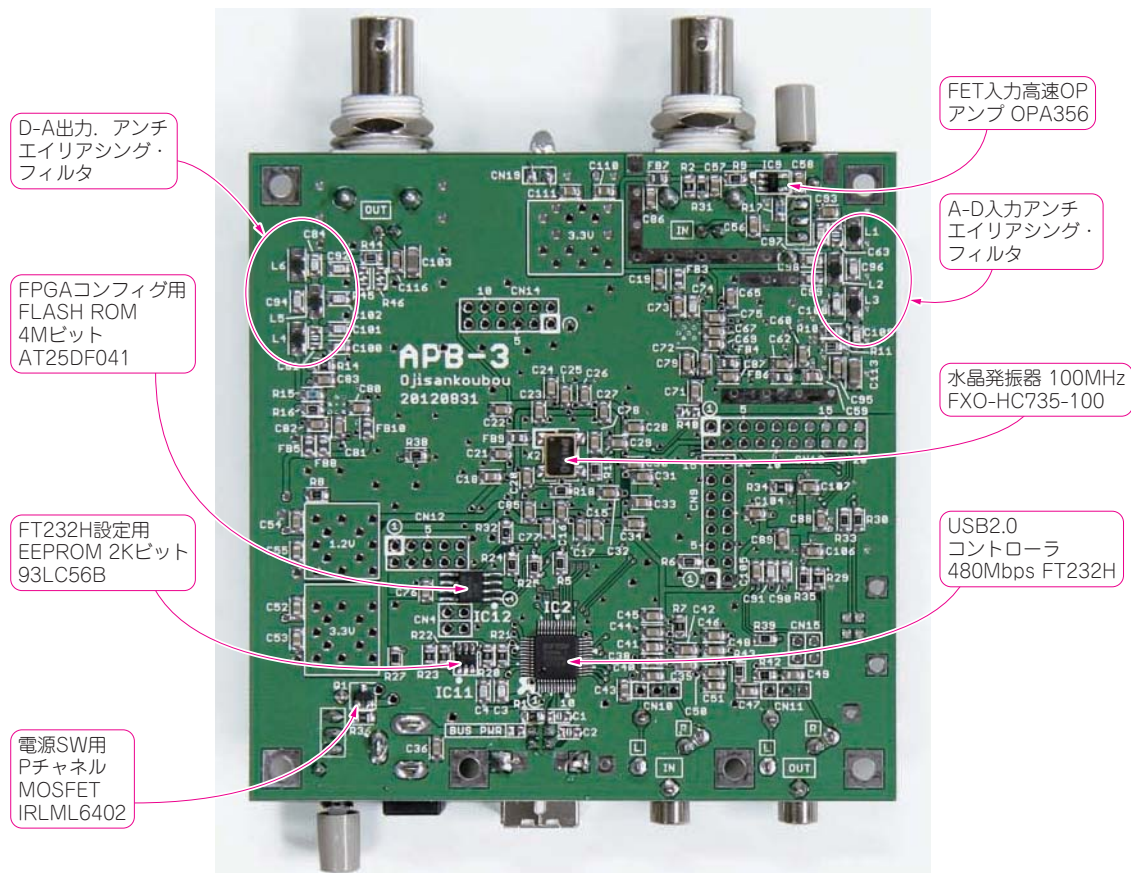


図1-2 APB-3基板の裏面

FPGAは開発ツールを利用して作ったコードをフラッシュROMから読み込んで機能する。そのコードはPCからUSBを通してボードに実装した4MビットのフラッシュROMに保存しておき、電源を入れればすぐにこのボード単体で利用できるようにしている。したがって、新しい機能を実装することもたやすいといえる。

CQ出版社

見本

このPDFは、CQ出版社発売の「トラ技エレクトロニクス No.1」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MTR/MTRZ201307.htm>

購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>

トランジスタ技術増刊

トラ技エレクトロニクス

No.1

CQ出版社

〒170-8461 東京都豊島区巣鴨1-14-2
TEL.03-5395-2141 (営業部)

定価2,310円

本体2,200円

雑誌 06664-07
©-2013.8/25



4910066640736
02200