

PlutoSDR 単体による 10GHz 帯の送信と受信

JA1SYK/松本 廣

要 約

・アップコンバータやダウンコンバータを使わず、PlutoSDR 単体で 10GHz 帯の送信と受信の実験をした。

・PlutoSDR は、パソコンの SDR ソフトと第 3 次高調波を利用して、基本波に対し減衰が 30dB 程度あるものの、手軽に 10GHz 帯の信号を送信したり受信したりできることがわかった。

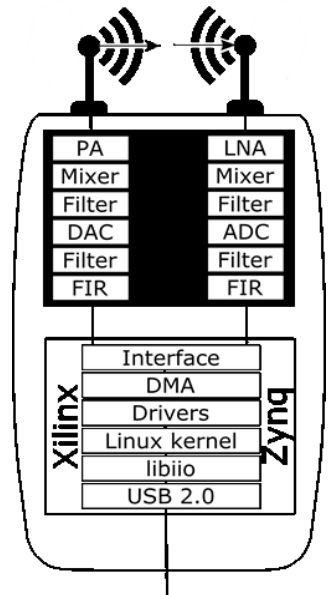
・PlutoSDR は上限周波数 3.8GHz まで動作する AD9363 を搭載しているが、これをソフトで AD9364 として設定することにより上限周波数を 6.0GHz まで拡張できる。PlutoSDR は 5.7GHz 帯を含め、マイクロ波の範囲まで送信も受信もできる SDR デバイスとして注目されている。

・他方、PlutoSDR で送信したとき、基本波の第 3 次高調波が強く出力されている。この高調波は、変調された基本波の高調波ではなく、基本波の高調波が変調された出力であることがわかった。PlutoSDR などに採用されている I/Q 変調回路(Mixer)は、これまでマイクロ波やミリ波で使ってきたハーモニックミキサ (変調) のような動作をしている、と理解できた。

・PlutoSDR の基本数を 3.413GHz の CW の出力レベルを 0dBm 程度に設定したとき、(PlutoSDR の上限周波数を超える) 第 3 次高調波 10.240GHz の出力レベルは、-30dBm 程度であった。

・一方、PlutoSDR は基本波の受信と同時に第 3 次高調波も受信している。基本波を 3.413GHz に設定したとき、(PlutoSDR の上限周波数を超える) 第 3 次高調波 10.240GHz が受信できた。この 10.240GHz の受信感度は、NF 40dB 程度であった。これは、基本波 3.413 GHz 帯の NF は 10dB 程度であり、送信と同様に受信でも第 3 次高調波は 30dB 程度減衰して聞こえている、と理解できた。

・PlutoSDR の前段に 10GHz 帯の LNA を接続することにより、受信感度 (NF) は向上した。



1 10.240GHz の送信

図1は、PlutoSDR(v0.29)のTx端子を10dBのATTを介してスペクトラムアナライザR3273に接続し、PlutoSDRの送信波形を観測している写真である。

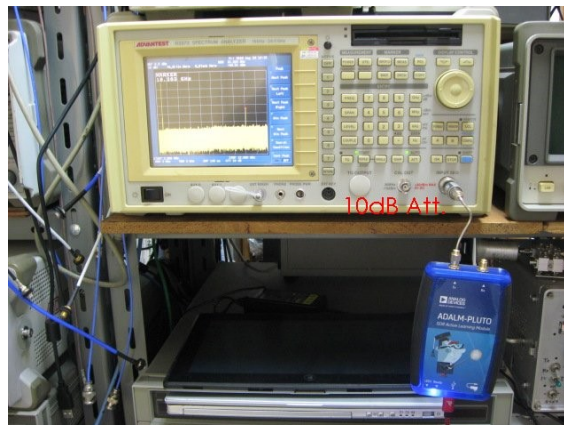


図1 送信出力の測定

1-1 第3次高調波の出力レベル

図2は、PlutoSDRにより送信周波数を3.413GHz、無変調波、出力レベル0dBm程度で送信したときのスペアナの画面である。

第3次高調波である10.240GHzが基本波の-30dBm程度の強度で確認できる。第2次高調波はノイズレベル以下であり、この画面からは確認できない。

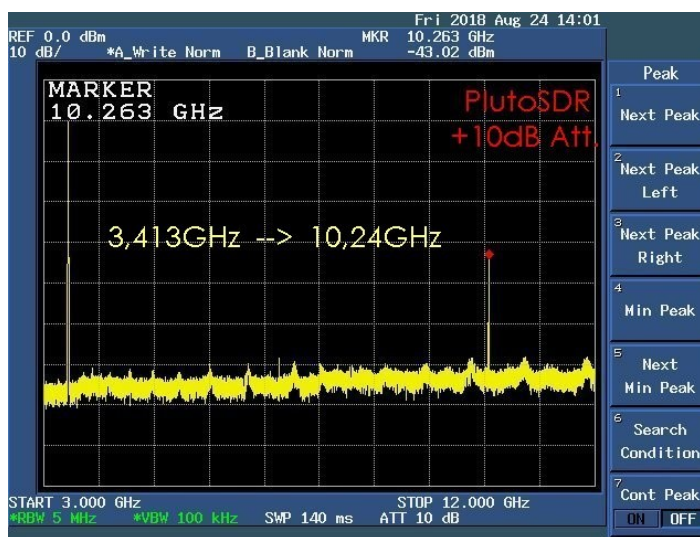


図2 第3次高調波

1-2 2 トーン信号の出力波形

図3は、PlutoSDRが3.413 GHzのSSBの2 トーン信号（1000Hzと1575Hz、周波数差575Hz）を送信したときの第3次高調波である。

第3次高調波であっても、二つのトーンの周波数の差は基本波と同様に575Hzであり、通倍されていない。このことから、基本波の3次高調波が変調された出力であることが確認できた。

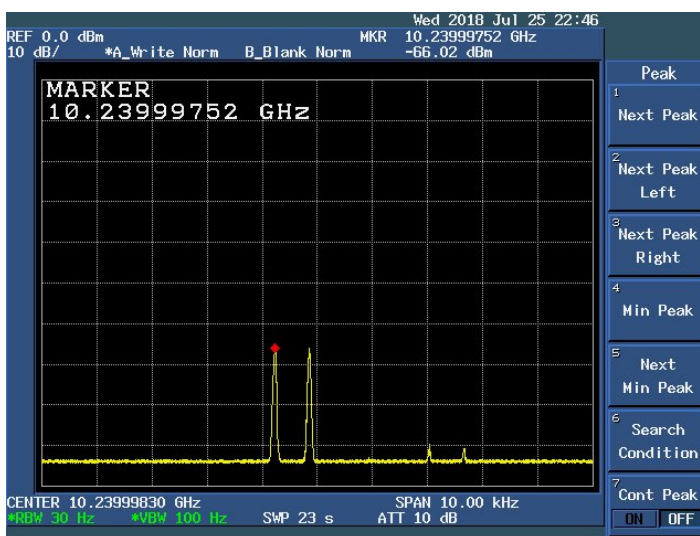


図3 SSB 2 トーン信号の波形

1-3 DATV 信号の出力波形

図4は、DVB-S2、SR2000(帯域2MHz)、8PSK に設定した送信周波数3.4083GHz の DATV 信号の第3高調波10.225GHz の波形である。高調波であっても帯域の拡大はなく、基本波と同じ2MHzの帯域であることが確認できる。

この信号は、DATV の受信ソフトであるMiniTiouner で支障なく受像できた。

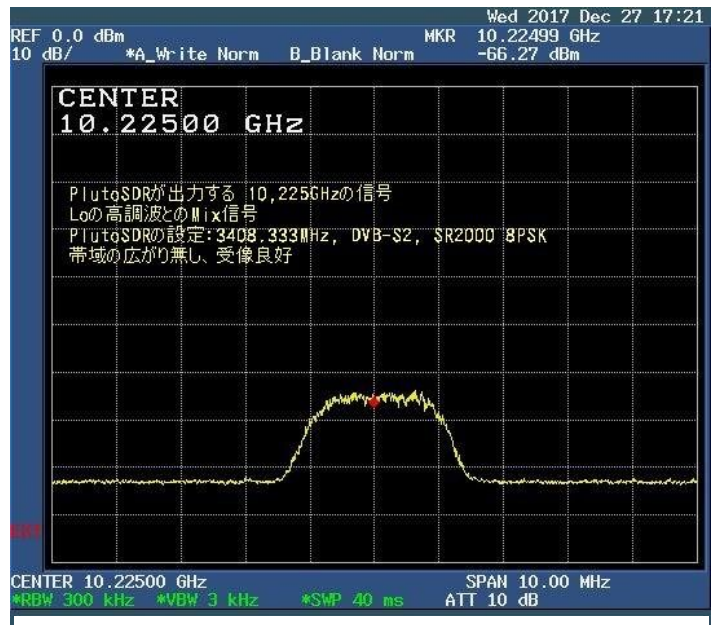


図4 DATV の出力波形

1-4 PlutoSDR の送信プログラム

PlutoSDR の送信は、Ubuntu 18.04.1 で動作する GnuRadio Companion(GRC)を使用した。

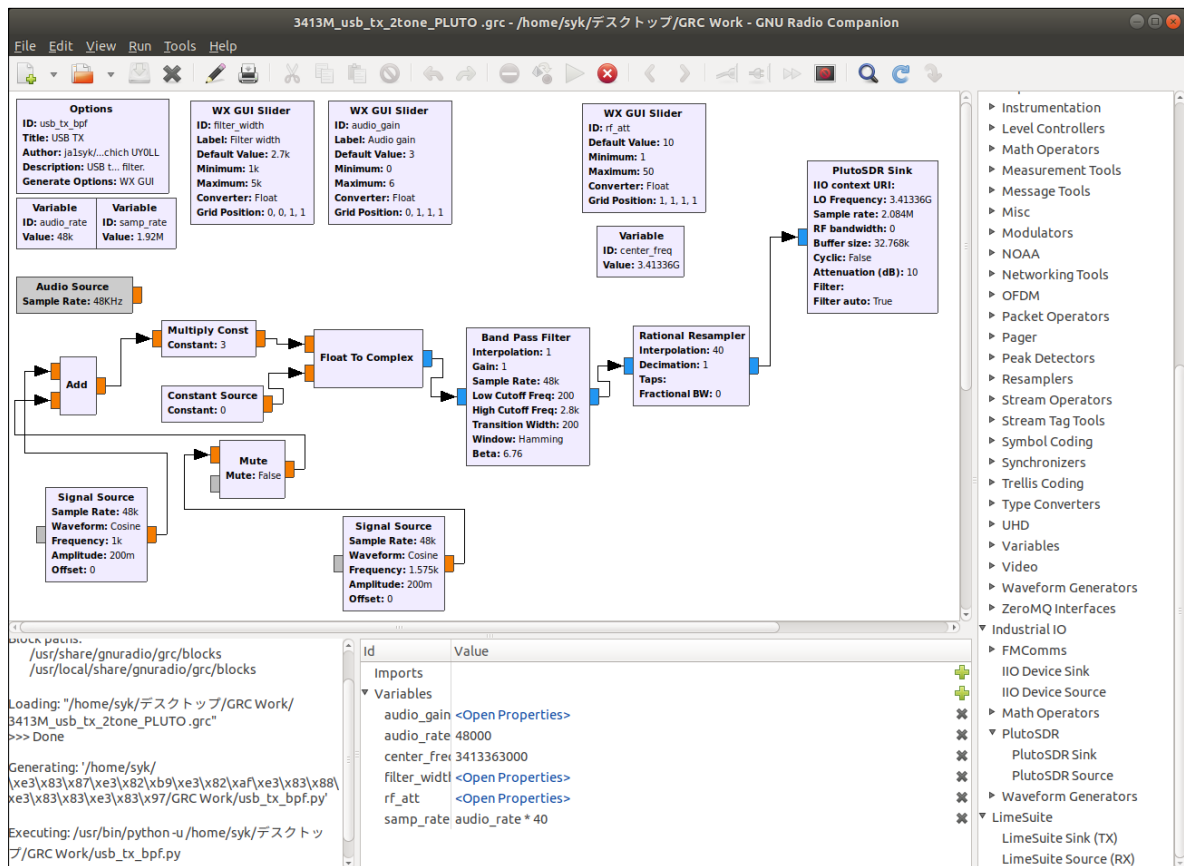


図5 Gnuradio による SSB 2 トーンの信号の送信

図5は、SSBの2トーン信号を送信している Gnuradio のブロック図の画面である。各ブロックの入力と出力を繋ぎ、それぞれのパラメータを設定するだけで、容易に送信することができた。

PlutoSDR の送信ブロック(PlutoSDR Sink)と受信ブロック(PlutoSDR Source)はアナログデバイス社から提供されている。使用したパソコンの CPU は Core i5、クロック 1.9GHz である。

なお、DATV の送信には日本語 Windows10 で動作する Express_DVB_Transmitter_v1.25LP10 を使用した。

2 10.240GHz の受信

2-1 ガン発振器の信号の受信

図6は、10.240GHz に調整したガン発振器(NEC ND771AA)の信号を PlutoSDR で受信している様子である。PlutoSDR の Rx 端子には 10GHz 帯のフィードホーンを接続し、ガン発振器のホーンアンテナと対面させた。

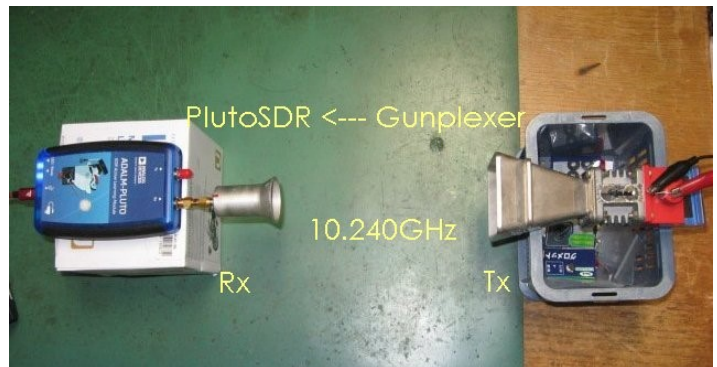


図6 ガン発振器の 10.240GHz を受信

図7は、Pluto SDR とパソコンを USB ケーブルで接続し、Ubuntu 18.04.1 で動作する SDR 受信ソフト gqrx を使用して、ガン発振器の 10.240GHz の信号を受信している画面である。

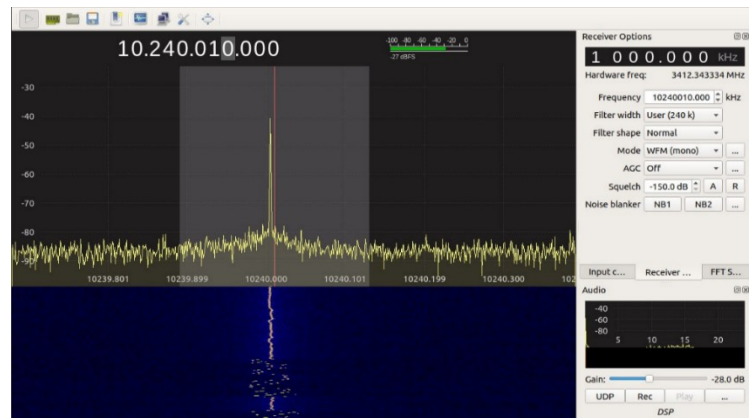


図7 ガン発振器 10,240GHz の受信(gqrx)

図7は、gqrx の LNB LO を 6826.666 667MHz に設定しているため受信周波数

が 10.240GHz と表示されているが、PlutoSDR の Hardware Freq.(動作周波数)は 3413.33333MHz である。図6の状態、フィードホーンを同軸ケーブルでスペアナの入力端子に接続したが、ガン発振器からの 3GHz 帯の信号は確認できなかった。したがって、PlutoSDR はガン発振器が出力する 10.240GHz の信号を、第3次高調波として受信していると判断できた。

2-2 シグナルジェネレータの信号の受信

図8は、シグナルジェネレータ(SG) HP 8340B
が出力する 10.240GHz の CW 信号を、PlutoSDR で
受信している様子である。

SG の出力端子には、同軸ケーブルを經由して
10GHz 帯フィードホーン(送信用：図8の右側)を接
続した。PlutoSDR の Rx 端子には、10GHz 帯用のフ
ィードホーン (受信用：図8の左側)を接続し、送
信と受信のフィードホーンは対面する位置に配置した。なお、これらのフィードホーンのリターンロ
ス (Return Loss)は-20dB 以下に調節してある。

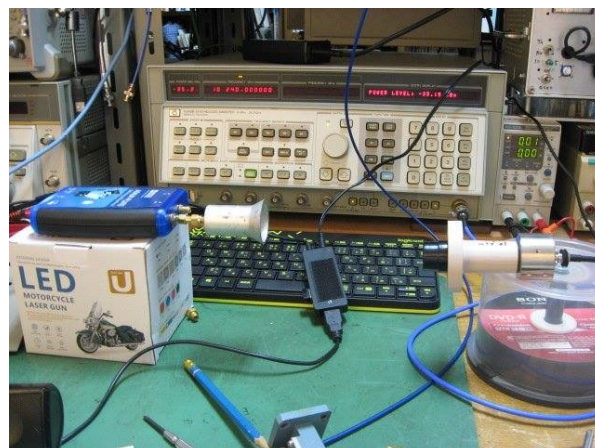


図8 SG の 10.240GHz を受信

図9は、PlutoSDR と gqrx を使用して SG が出力する 10.240GHz の CW 信号を受信しているパ
ソコンの画面である。前項のガン発振器と同様に受信できた。

なお、SG HP 8340B が出力する 10.240GHz の信号をスペアナ R3273 で確認したが、10.240 GHz
の 1/3 である 3.413 GHz 帯の信号は Noise level 以下であり画面上では確認できなかった。

また、送信と受信に使用しているフィードホーンは両者とも 10GHz 帯の導波管タイプであり、遮断
周波数以下の低域であ
る 3.413GHz 帯の減衰
は大きいと思われる。
すなわち、PlutoSDR
の Rx 端子への
3.413GHz 帯の信号の
存在は無視できる程度
であると判断した。

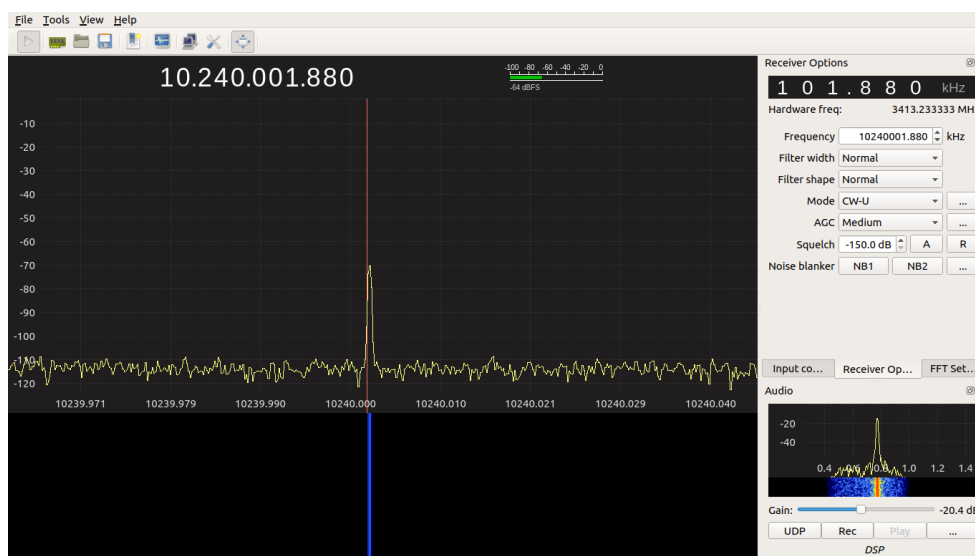


図9 gqrx による SG の 10.240GHz の受信

3 10.240GHz 帯の受信感度

3-1 受信感度 (Noise Figure : NF) の測定

PlutoSDR は受信周波数を 3.413GHz に設定すると、第 3 次高調波である 10.240GHz の信号を受信できることがわかった。この 10.240GHz の受信感度を、QEX No.22 に掲載されている受信感度に関する記事(以下、QEX の記事と略す。〔筆者：JA1OGZ/金子 明さん〕)を参考にし、「図 2 MDS 測定の接続」に従って測定した。

3-1-1 シグナルジェネレータ HP 8340B の使用

QEX の記事の「MDS 測定の接続」における「SG1」として HP 8340B を使用した。HP 8340B の最低の信号出力は-110dBm であるため、PlutoSDR の RX 端子との間に-30dB の固定減衰器(ATT)を挿入し-140dBm として測定した。なお、HP 8340B は校正されていないため受信感度の絶対値の測定は困難である。今回は、相対的な比較や傾向を知る目安とした。

3-1-2 SDR 受信ソフト gqrx の使用

QEX の記事の「MDS 測定の接続」における「DUT 無線機」として、受信ソフト gqrx を使用した。gqrx は、SSB モード、帯域 2.4kHz、RF 利得は 77dB、AGC はすべて OFF に設定した。

図 10 のように、パソコンのオーディオ出力端子は 8Ω で終端して A C ボルトメーターに接続した。

QEX の記事の「MDS 測定の結果表示」から、帯域 2.4kHz の場合 Lowest Noise は-140dBm となる。

ノイズレベルから 3dB 上昇したシグナルジェネレータの出力レベルが MDS(最小検出レベル、Minimum Detectable Signal : Noise Floor)となる。

Lowest Noise(-140dBm)と MDS の差から受信感度(Noise Figure : NF)を求めることができる。

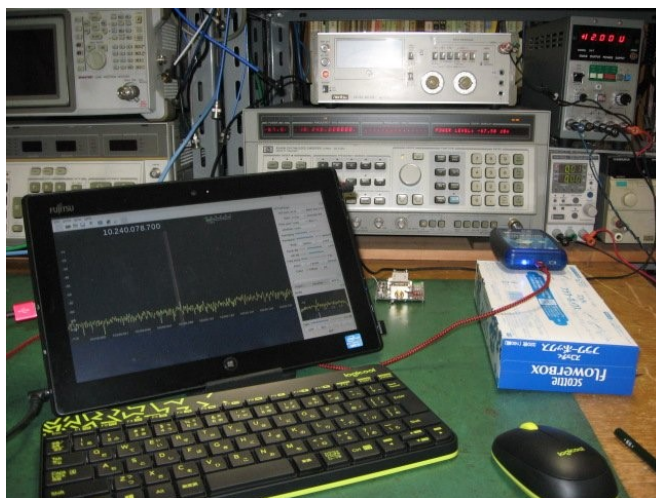


図 10 受信感度(NF)の測定

3-2 ローノイズ・プリアンプ(LNA)の接続

PlutoSDR 単体と、PlutoSDR の Rx 端子に LNA-1 (NF:1.5dB, Gain:30dB 程度：メーカー表示値)、または LNA-2 (NF:1.0dB, Gain:23dB：メーカー表示値) を接続した場合、さらに LNA-2 と LNA-1 を直列に接続した場合について、それぞれの受信感度(NF)を測定した。

3-2-1 PlutoSDR 単体の受信感度

PlutoSDR 単体の受信感度(NF)は 40dB 程度であった(図 11)。

これは、基本波 3.413GHz の NF が 10dB 程度であり、送信時のロスが 30dB 程度であることから確からしいと推定できる。



図 11 PlutoSDR 単体の受信感度を測定

3-2-2 LNA-1 を接続した受信感度

PlutoSDR の Rx 端子に中心周波数 10.240GHz の BPF と LNA-1 を接続した(図 12)。

受信感度(NF)は 14.5dB 程度に改善した。

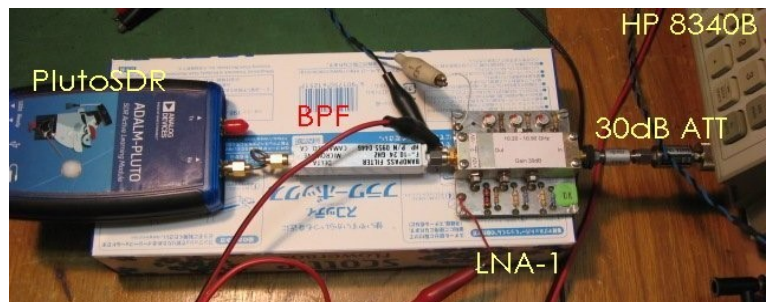


図 12 LNA-1 を接続した受信感度の測定

3-2-3 LNA-2 を接続した受信感度

PlutoSDR の Rx 端子に中心周波数 10.240GHz の BPF と LNA-2 を接続した(図 13)。

受信感度(NF)は 17dB 程度に改善した。

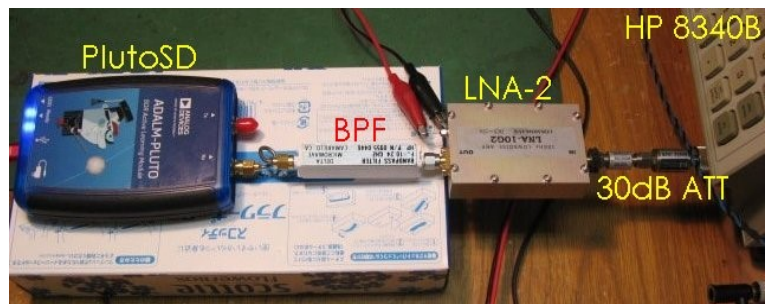
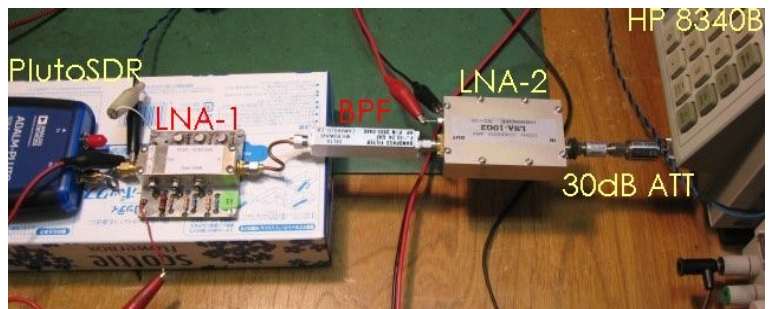


図 13 LNA-2 を接続した受信感度の測定

3-2-4 LNA-2 と LNA-1 を接続した受信感度

PlutoSDR の Rx 端子に LNA-1 と中心周波数 10.240GHz の BPF を接続し、さらに前段に LNA-2 を接続した。



この結果、受信感度(NF)は 3 dB 程度に改善した(図 14)。

図 14 LNA-2 と LNA-1 を接続

3-3 LNA による受信感度の改善

PlutoSDR に LNA を接続した実験の結果を、表 1 にまとめた。

	PlutoSDRの10.24GHz(第3次高調波)			gqrx(Ubuntu)使用	
	GHz	2.4k:dBm	MDS:dBm	NF	LNA's
☒11	10.24	-140	-100	40	No-LNA
☒12	10.24	-140	-125.5	14.5	LNA-1
☒13	10.24	-140	-123	17	LNA-2
☒14	10.24	-140	-137	3	(LNA-2)+(LNA-1)

表 1 LNA による受信感度(NF)の改善

PlutoSDR 単体の NF は 40dB 程度であるが、前段に NF 1~2dB 程度、Gain 20~25dB 程度のプリアンプ(LNA1、LNA-2 など)を接続することにより、NF は 15~17dB 程度に改善することがわかった。

さらに、これらのプリアンプを 2 台直列((LNA-2)+(LNA-1))に接続すると、NF は 3dB 程度まで改善することがわかった。

なお、10,240GHz 帯の受信は第 3 次高調波の受信であること、PlutoSDR は基本波、高調波とも広帯域に受信していることから、中心周波数 10.240GHz のバンドパスフィルタ(BPF)を挿入した。

3-4 試験(ビーコン)信号の受信

室内でのガン発振器やシグナルジェネレータの信号の受信だけでなく、実際に空間を飛来する電波信号(ビーコン信号)の受信を試みた。

PlutoSDR で、自宅のベランダに設置した 10.240GHz ビーコン発振器(出力-30dBm 程度、ホーン型アンテナ)の送信信号を受信することができた。

アンテナは中古の BS 放送受信用のオフセット型パラボラ・アンテナを使用した。

3-4-1 LNA と PlutoSDR の配置

図 15 のように、フィードホーンと LNA の接続はセミリジット同軸ケーブルが最短距離になるように配置した。LNA の後段には BPF を挿入した。

なお、今回使用したフィードホーンは、この BS アンテナの LNB の開口部を切断し、同径の市販の 10GHz 帯円形ホーン(オチョコ)を接続した。リターンロスは 22dB 程度である。

PlutoSDR は、図 16 のように反射器の後方に配置した。

3-4-2 パソコンの配置と受信ソフト gqrx

パソコンは、図 17 のように反射器の背面に配置し、Ubuntu で動作する SDR 受信ソフト gqrx を使用した。

なお、当初プライム型パラボラ・アンテナで実験したが、調整と特性の確認が不十分であったため受信が困難であった。このため、今回オフセット型アンテナで実験をやり直した。

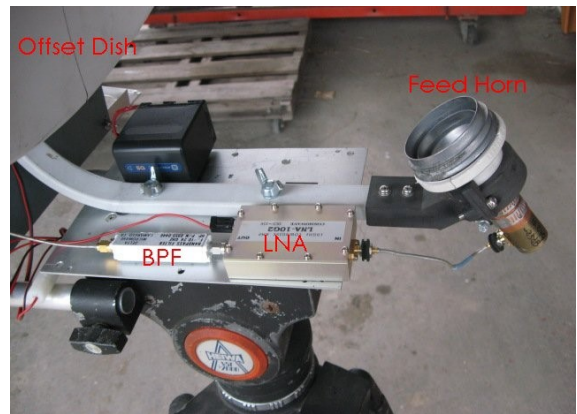


図 15 ホーンに LNA を接続

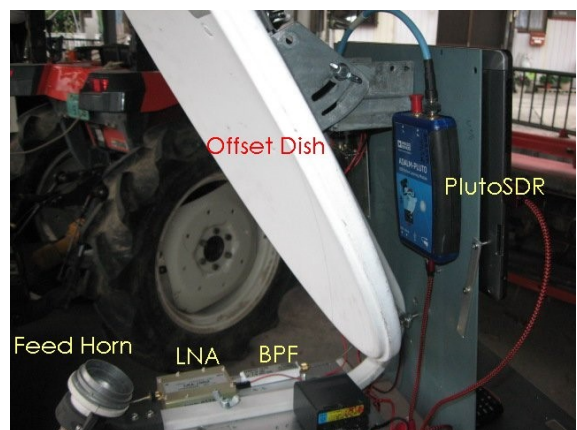


図 16 PlutoSDR の配置



図 17 パソコンと gqrx の画面

4 PlutoSDR の特徴

4-1 12 ビットのレゾリューション(Resolution)

PlutoSDR のレゾリューション (分解能・解像度) は 12 ビットである。すなわち、受信時に入力されるアナログ信号である高周波信号は、12 ビットのコンバータでデジタル信号に変換される。逆に送信時には、デジタル信号を 12 ビットのコンバータでアナログの高周波信号に変換され送信する。

詳しくは、以下のアナログデバイセズ社が提供している SDR に関する技術資料(Software-Defined-Radio-for-Engineers)に記されている。

<http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf>

この資料に、SDR の分解能と dBFS (注 1) に関する Table があったので、表 2 に引用する。

Table 2.3 Quantization: The Size of a Least Significant Bit					
Resolution (N)	2^N	Voltage (20 Vpp) ¹	PPM FS	%FS	dBFS
2-bit	4	5.00 V	250,000	25	-12
4-bit	16	1.25 V	62,500	6.25	-24
6-bit	64	313 mV	15,625	1.56	-36
8-bit	256	78.1 mV	3,906	.391	-48
10-bit	1,024	19.5 mV	977	.097	-60
12-bit	4,096	4.88 mV	244	.024	-72
14-bit	16,384	1.22 mV	61.0	.0061	-84
16-bit	65,536	305 μ V	15.2	.0015	-96
18-bit	262,144	76.2 μ V	3.81	.00038	-108
20-bit	1,048,576	19.0 μ V	.953	.000095	-120
22-bit	4,194,304	4.77 μ V	.238	.000024	-132
24-bit	16,777,216	1.19 μ V	.0596	.0000060	-144
26-bit	67,108,864	298 nV ¹	.0149	.0000015	-156

¹ 600 nV is the Johnson (thermal) noise in a 10-kHz BW of a 2.2 k Ω resistor at 25°C.

表 2 SDR の分解能と dBFS

表 2 によると、分解能 12 ビットである PlutoSDR や LimeSDR の dBFS は、-72dBFS である。

ちなみに、分解能 8 ビットである RTL-SDR や HackRF One の dBFS は、-48dBFS である。

注 1: dBFS とは、Web の用語辞典によると、FS は「フルスケール」の事で、デジタルで表現可能な最大値を 0dBFS として、表現可能な最小値を dB で表したものである、との解説がある。

4-2 PlutoSDR の RF フィルタ

以下のアナログデバイス社のサイトに、PlutoSDR の 3 倍高調波に関する記述がある。

<https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/name>

以下に引用するように、PlutoSDR は搭載している I/Q 変調集積回路(AD9363)の送信・受信のピンは、それぞれ filter 等介さず直接出力・入力 SMA 端子に繋がっている、と書いてある。すなわち、PlutoSDR の送信・受信回路には高調波を阻止する特別な LPF は存在しない。

例えば、送信時には I/Q 変調で発生する高調波信号 10.240GHz も SMA 端子から出力される。受信時には、SMA 端子から入力された高調波信号 10.240GHz も AD9363 に到達し処理される。

このような PlutoSDR の特徴は 10GHz 帯に限らず、マイクロ波ユーザーには好都合である。

自動翻訳の引用（機械翻訳はやや難解・・・）

RF フィルタリング

PlutoSDR には、事前選択フィルタまたは出力フィルタはありません。AD9363 から出てくるものは、SMA コネクタから出てくるものです。アンテナには、AD9363 ピンに供給されるものが含まれます。AD9363 の RF トランスミッタは LO 周波数の中程度の 3 次高調波を出力します。LO が 3GHz（3 次高調波は 9 GHz、PlutoSDR の差動シングルエンド変換に使用されるバランの範囲外です）の場合、これはかなり低くなります。しかしながら- LO が 500 である場合メガヘルツ、第三高調波 1500 あろうメガヘルツ、全体範囲を withing。500 MHz で RF 信号を送信している場合は、1500 MHz でもブロードキャストしています（誤って）。これは、特定の事前選択フィルタまたは出力フィルタを追加することによって簡単に克服できます。あなたがやりたいチューニングレンジによっては、かなり複雑になることがありますし、使用しているアンテナの種類にも依存します。（アンテナもフィルタです）。

以下、原文の引用

RF Filtering

There is no preselect, or output filters on the PlutoSDR. What comes out of the AD9363 is what comes out of the SMA connector. What comes into the antenna is what is provided to the AD9363 pins.

The RF transmitter in the AD9363 does output a moderate 3rd harmonic of the LO frequency. This will be fairly low if your LO is at 3 GHz (where the 3rd harmonic would be 9 GHz, outside the range of the balun used for the differential to single ended conversion in the PlutoSDR). However - if the LO is at 500 MHz, the third harmonic would be 1500 MHz, entirely withing the range. If you are transmitting an RF signal at 500 MHz, you will also (inadvertently) be broadcasting at 1500 MHz as well.

This can easily be overcome by adding specific preselect or output filters. Depending on the tuning range you want to do, can complicate things pretty drastically, and also depends what sort of antenna you are using. (Antennas are also filters).

4-3 送信出力の周波数特性

図 18 は、JA1QHJ/江原光保さんが PlutoSDR が送信する DATV : DVB-S2 の MER (スタック丈) を 40dB 程度確保したときの、各周波数における送信出力を HP8481 で測定した値のグラフである。PlutoSDR の基本波の送信出力と周波数の特性の関係やその傾向を掴むことができる。



図 18 PlutoSDR の送信出力特性

Carrier(キャリア)の値は、DATV で 40dB 程度の MER を確保したときの無変調波(キャリア)の出力の値であり、DATV より+3dBm 程度の値になっている。

NFM や SSB、CW など狭帯域の信号では、さらに大きな出力(3GHz 帯で 0dBm 程度)で使うことができる。

4-4 USB2 端子の転送速度

USB2.0 の最高転送速度は 30MS/s 程度であるが、PlutoSDR の実測値は 4MS/s 程度との報告がある。特に高解像度を要求する DATV などでは USB3.0 仕様(100MS/s 程度)の SDR デバイスに溝を開けられている。PlutoSDR の USB は内部のソフトウェアで改善できるとのこと、期待したい。

参考資料

1. ADALM-PLUTO (PlutoSDR)の設定マニュアル—DATV の送信と SDR#による受信—、JA1SYK/松本 廣、<http://www5.wind.ne.jp/ja1syk/pluto/pluto-index.html>
2. 受信感度、SSB 受信機測定法、別冊 CQ ham radio QEX Japan No.22、JA1OGZ/金子明、<https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MBC/MBC201703.html>
3. PlutoSDR の出力特性、JA1QHQ/江原光保、<https://www.facebook.com/photo.php?fbid=1391466050958752&set=gm.1707447752624274&type=3&theater&ifg=1>
4. Ubuntu 18.04.1 LTS、<https://www.ubuntulinux.jp/News/ubuntu1804-ja-remix>
5. Install Gqrx SDR on Ubuntu Linux、<http://gqrx.dk/download/install-ubuntu>
6. ADALM-PLUTO for End Users、<https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users>
7. Installing GNU Radio、<https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/gnuradio>
8. Why "Pluto"、<https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/users/name>
9. Software-Defined-Radio-for-Engineers、<http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf>
10. Airspy Sensitivity Measurement by W9RAN 及びコメント、<https://www.youtube.com/watch?v=cloJihBSR40>
11. Practical Noise-Figure Measurement and Analysis for Low-Noise Amplifier Designs (AN 1354)、<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5980-1916E.pdf?id=1000001802:epsg:apn>

Tx and Rx on 10GHz using the PlutoSDR without up or down converters

By Hiroshi Matsumoto, JA1SYK, Oct. 2018