

FT8 模式的真实信噪比 (BD4KC 粗略翻的)

简介

在进行 FT8 模式通讯时，你可能看到一个负值的信噪比报告，数值范围在 -27dB 到 -1dB 之间，根据常识，负值说明信号低于本底噪声。

实际上，这不是真的，频移键控 (FSK) 的声音信号要远高于噪声底。

接收 FT8/JT65/JT9 这样的数字信号时，信号报告实际上是以很宽带宽的噪声底为参考，基本上是 2500HZ。这和 FT8 的 50HZ 带宽实际上不一致。有用数据的带宽甚至更小，实际检波带宽 (50HZ) 中的一部分用作前向纠错的冗余数据，为了使通讯更顺畅。

这种计算方式，明显不同于通常在 FSK 单音带宽内计算信噪比的数值

什么是 S/R 信噪比

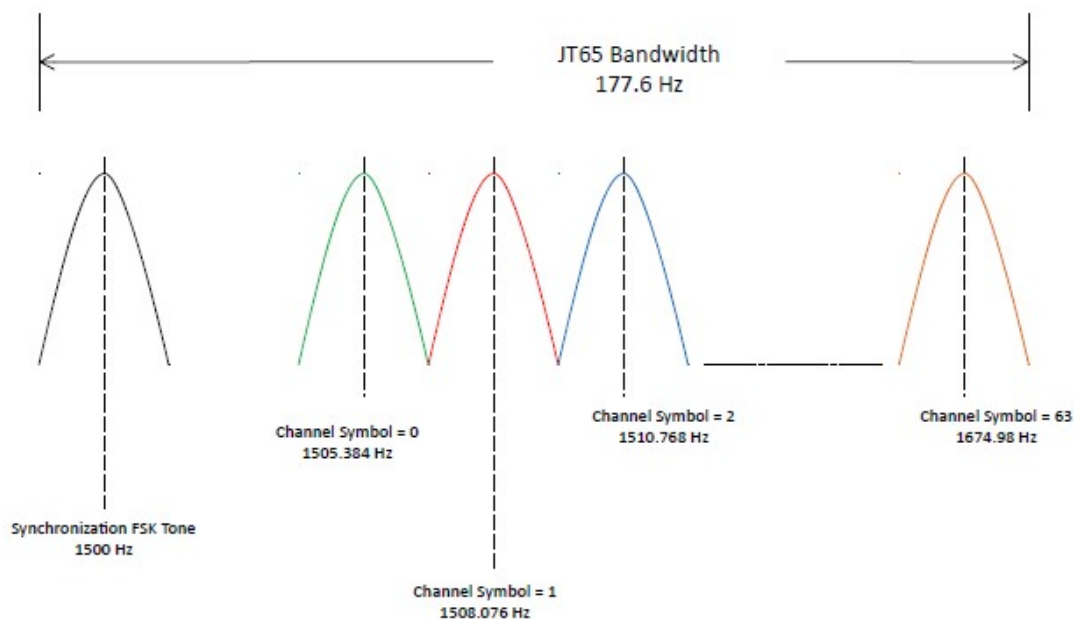
信噪比 SNR 以 db 表示

S =远地接收机实际收到的信号功率，这个变量是你在 SNR 计算中唯一能控制的参数。

在远处，你将如何决定接收机收到的信号功率？你可以增加/减少发射端的发射功率；你可以使用不同增益的天线等。实际上你受限于有效辐射功率 (ERP)。

N =远地接收机收到的噪声功率，仅仅由远地接收机决定，发射台站对这个参数没有影响。噪声有很多来源：大气噪声（全世界范围的人造物或者闪电产生的）、宇宙噪声（大气层以外传来的）、接收机固有的噪声。

JT65 的频谱（原文：波形）和检波带宽如下图



图上的 JT65 信号，带宽 177.6Hz。JT5 这个名字是发明人乔·泰勒命名的，实际上 JT65 使用了 64 个音调的 FSK，额外的第 65 个子带（以下每个音调简称“子带”），用来维护时间和频率同步。总数 65 个子带，其中 64 个有效数据。

当发射时，FSK 的同步子带总是发送两倍于有效数据子带的时长

64 个子带，每一个子带代表了一个 6 位的符号信息（例如 ASCII 码）

每当发射，JT65 占用（大约）带宽 178Hz。更仔细观察，可以发现，每个 FSK 信号甚至只占用了 2.692Hz 这么小的带宽。只有在这么窄的带宽内的噪声，才会影响我们计算 SNR 并决定了是否成功接收信息。

“检波带宽的 SNR”意思就是 FSK 符号相对于噪声功率密度的比值。

测试方法

为了验证计算时的带宽相对于计算结果的显著影响（检波带宽和 2500Hz 带宽）我装备了一套 JT65 的发射机和接收机，互相连接

如下图：

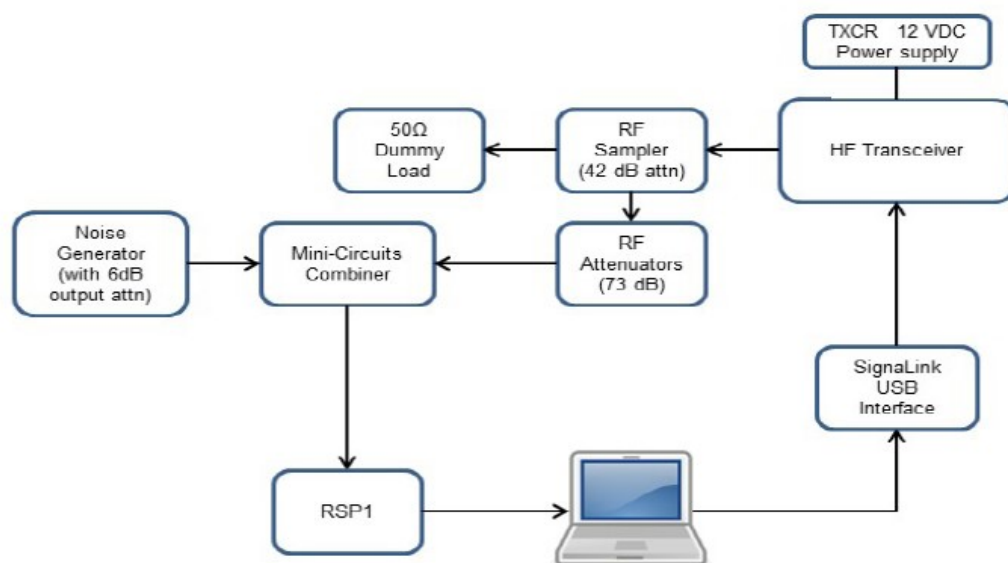
一台电脑运行 WSJT-X 软件，产生一个 CQ 信息（CQ KC5RU0 DM65）

编码的 FSK 音调信号，通过 USB 接口盒子给到发射机（八重洲 FT891）

FSK 音调信号调制在 14.076 载波上，发送给接收机

接收机使用的是 SDRPLAY 的 RSP1，另外采用了模拟家中真实环境的噪声源，一起送到接收机的天线端。

为了让信号下降到 S1，即大约 -121dBm，我使用了一些衰减器。实际衰减量调到了 115dB



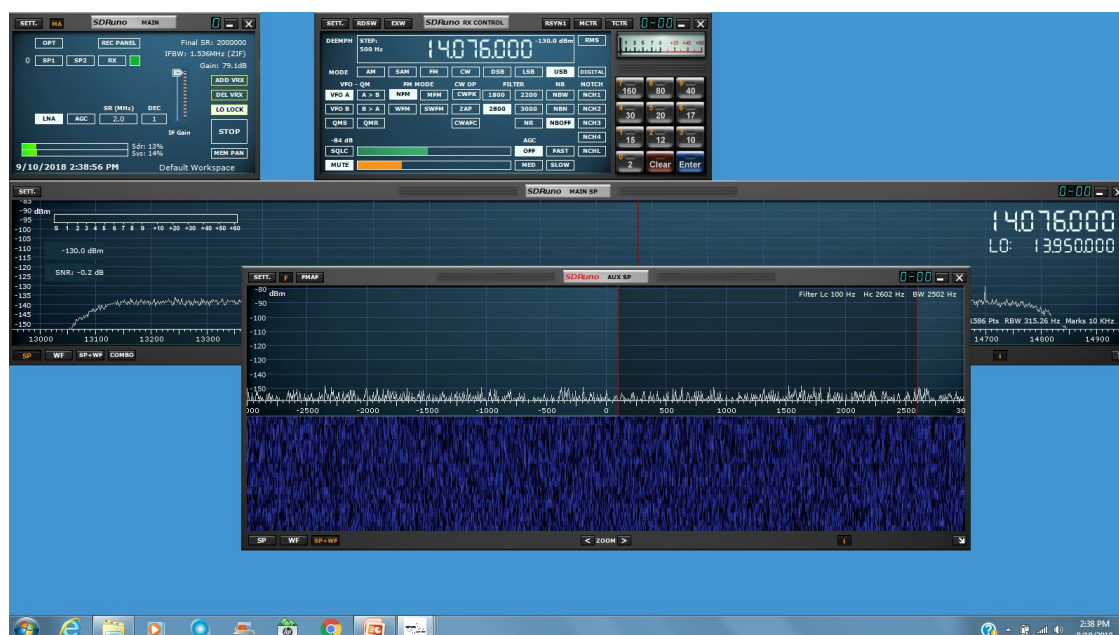
接收机使用 SDRUNO 软件，这个软件能够设定通带宽度 SP2，还能看到数值和瀑布图。

RMS 有效功率值就是在设定 SP 通带内测试到的有效功率，用来测试预设 SP2 带宽内的信号和噪声的功率。

SNR 就能从测量数值中计算出来，特别要注意，SDRUNO 实际上显示的 SNR 是 $(S+N)/N$

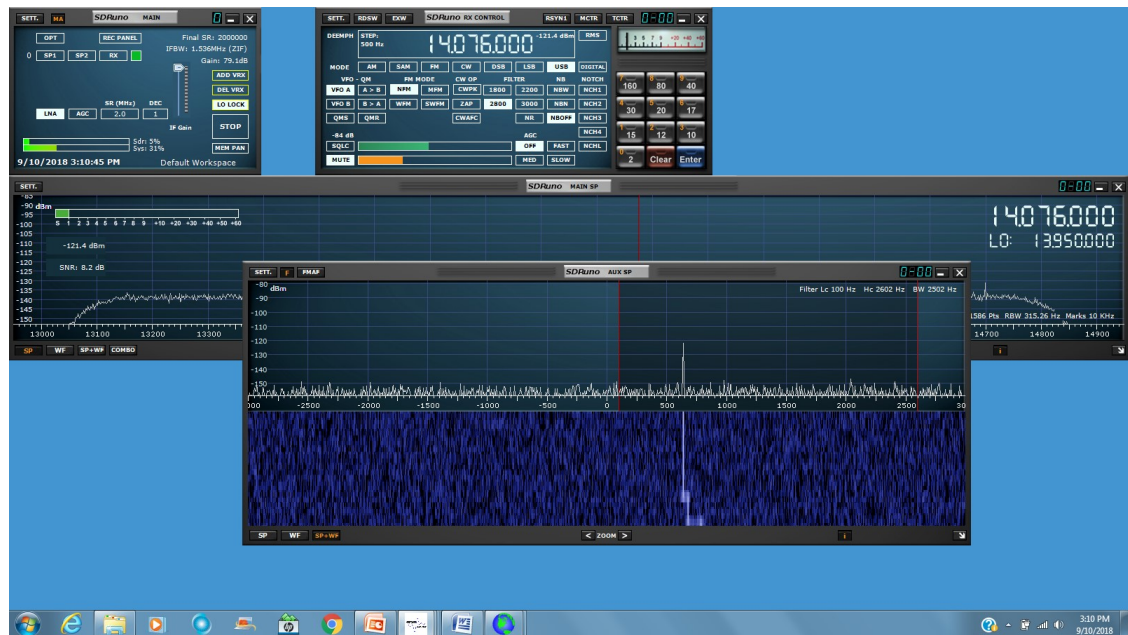
一台普源精电的 DG4162 函数信号发生器作为噪声源，设置为白噪声（AWGN）发生器

使用 Mini-circuits 的桥，混合两种信号，一起送给 RSP1 接收机。以下是测量的屏幕截图。可以看到噪声底，SP2 带宽设定位 2500HZ。下图是电脑界面：



测试过程

下图是发送信号时的截图



接收机噪声计算带宽为 2500HZ

RSP1 接收机的底噪大约是-130dBm（比 S1 低了 9dB）

NPB=SP2 预设带宽下的噪声功率

NPB 大约是-130dBm

噪声带宽 2500HZ

S_{PB} =在 SP2 预设带宽内的信号功率 $\approx -121 \text{ dBm}$ = S1 的信号报告

RSP1 接收机的噪声底 $N_{PB} \approx -130\text{dBm}$ 是整个接收系统的噪声，噪声带宽 = 2500 Hz

计算：SNR $\approx 9 \text{ dB}$

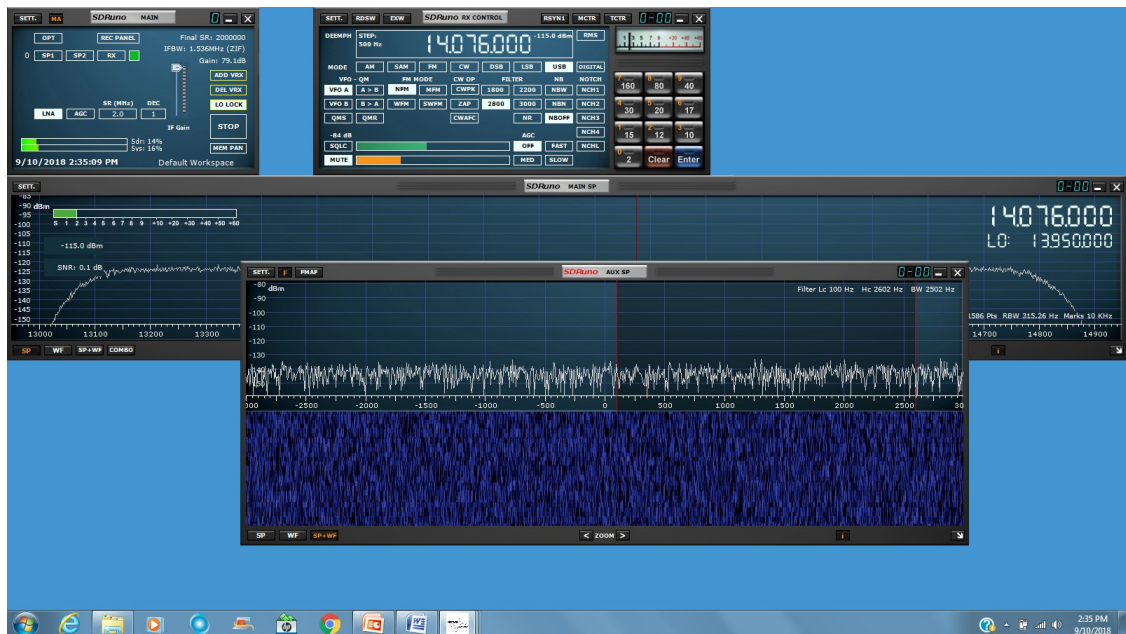
值得注意的是：

SDRuno 实际测量的有效值功率（RMS）是噪声和信号相加的= $(S_{PB} + N_{PB})$

也就是说。SDRUNO 实际测出的 $SNR = (S_{PB} + N_{PB}) / N_{PB}$

注意，JT65 信号比底噪明显大很多，因此这样计算并不会偏离太过分。

下图是附加的白噪声

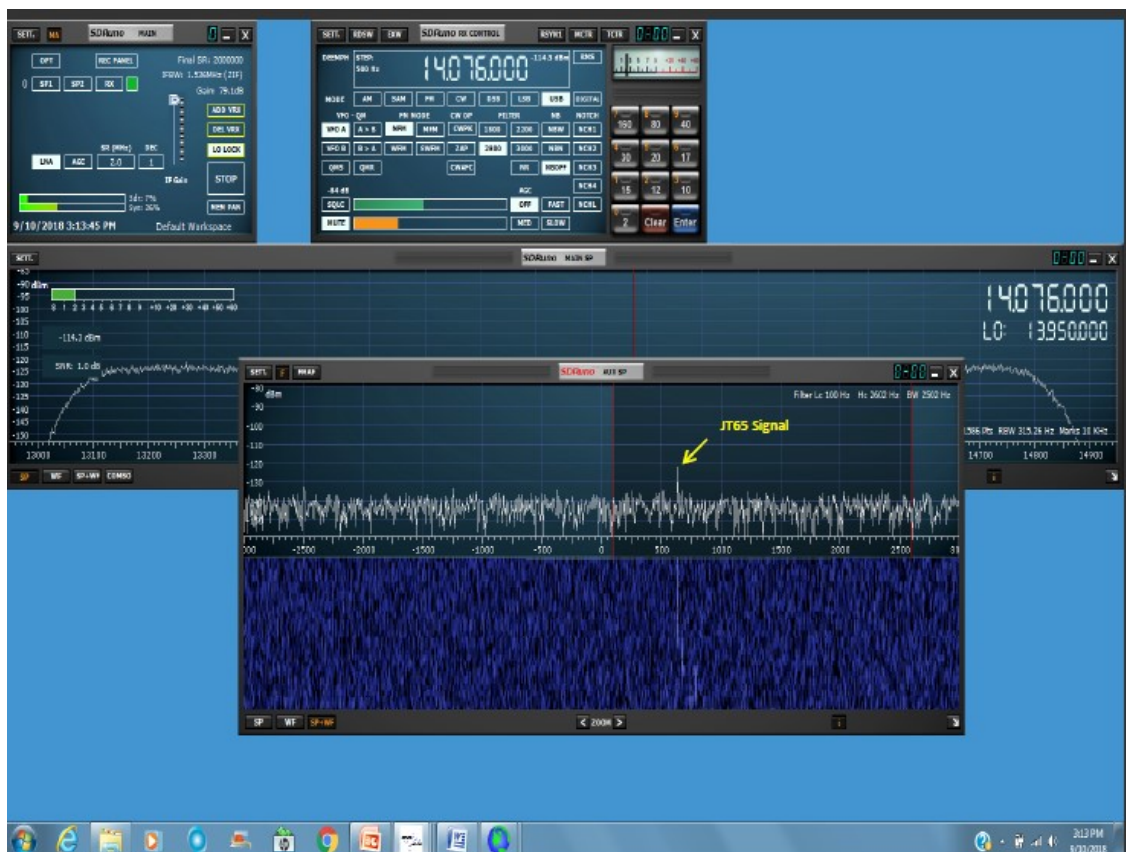


SP2 预设带宽=2500HZ

接收机本底噪声带宽 = 2500 Hz

白噪声功率 (AWGN) = $N_{PB} \approx -115 \text{ dBm} = S2$ 信号报告

下图是信号叠加噪声



接收机预设 SP2 带宽=2500HZ

$(S_{PB} + N_{PB}) = -114 \text{ dBm}$ 噪声底+信号

这里的 $S_{PB} = -121 \text{ dBm}$ $N_{PB} = -115 \text{ dBm}$

有趣的事情来了 N_{PB} 大约比 S_{PB} 高了 6 dB（接收机带宽 2500HZ），也就是说噪声比信号更强。

信噪比（原文：噪声带宽）的计算值，不使用 JT65 检波带宽限制的情况下，会显著受到噪声的影响

SNR 测量值 $\approx 1.0 \text{ dB}$ ($S_{PB} + N_{PB} = -114 \text{ dBm}$, $N_{PB} = -115 \text{ dBm}$)

这里的 $SNR = (S_{PB} + N_{PB}) / N_{PB}$ ，受到 N_{PB} 的影响更大。

既然噪声数值更大，我们为什么还能明显看到 FSK 的音调信号，并且上图这个信号是比底噪更高的。

这是因为 FSK 信号的能量集中在很小带宽内，这里是 2.692HZ, FSK 信号的检波带宽=2.692HZ

在如此小的检波带宽内，信号能量浓缩了，就明显更高。

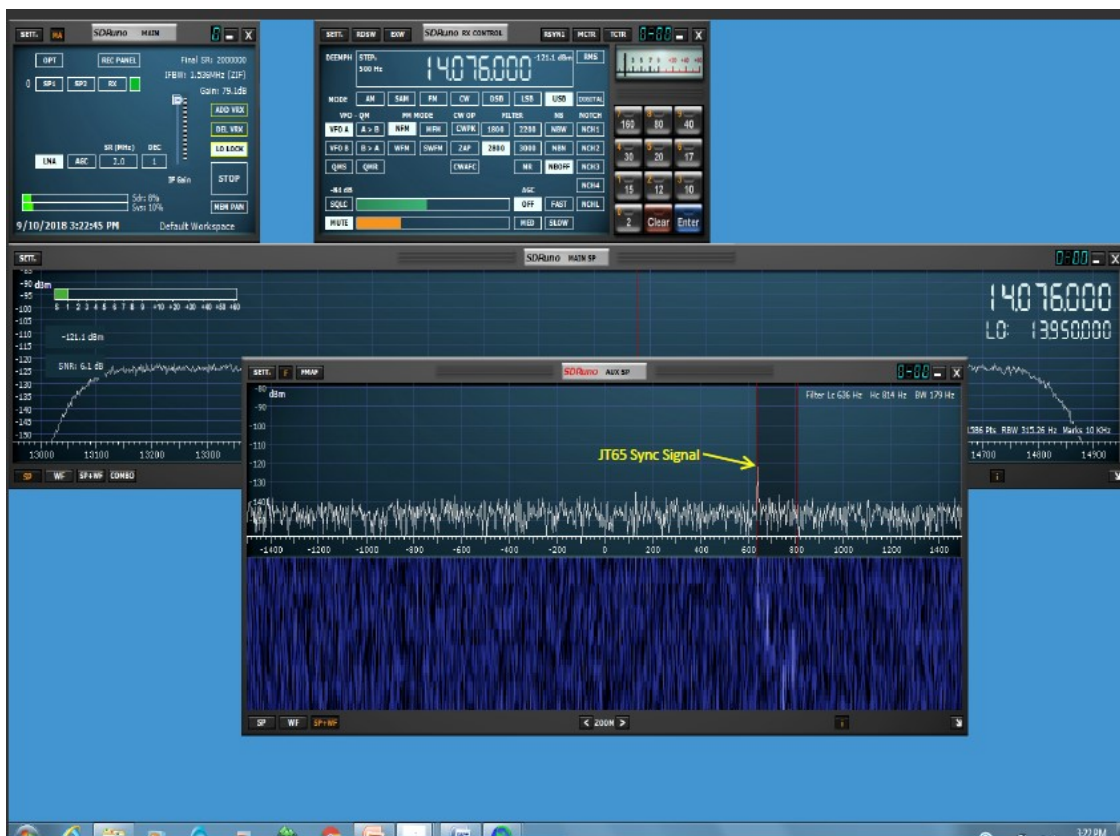
你看到了，如果 FSK 音调带宽扩散到 2500HZ 的话，我们是看不到信号的。如此的话，信号能量也将被扩散到整个接收机通带的 2500HZ 内，就像埋没于荒草之下。

是 FSK 检波带宽内的 SNR 决定了是否成功通讯，而不是整个 2500HZ 内的信噪比。

结论

当接收机的噪声带宽降低，接近实际检波带宽时，SNR 会增加。

我用 SDRUNO 软件，设置 SP2 带宽到 179HZ，基本等同于发射机 JT65 的必要带宽。回忆一下，JT65 信号带宽内充满了 1 个同步子带，和 64 个数据子带（子带=音调），如下图。



接收机软件的 SP2 带宽设定为 = 179 Hz

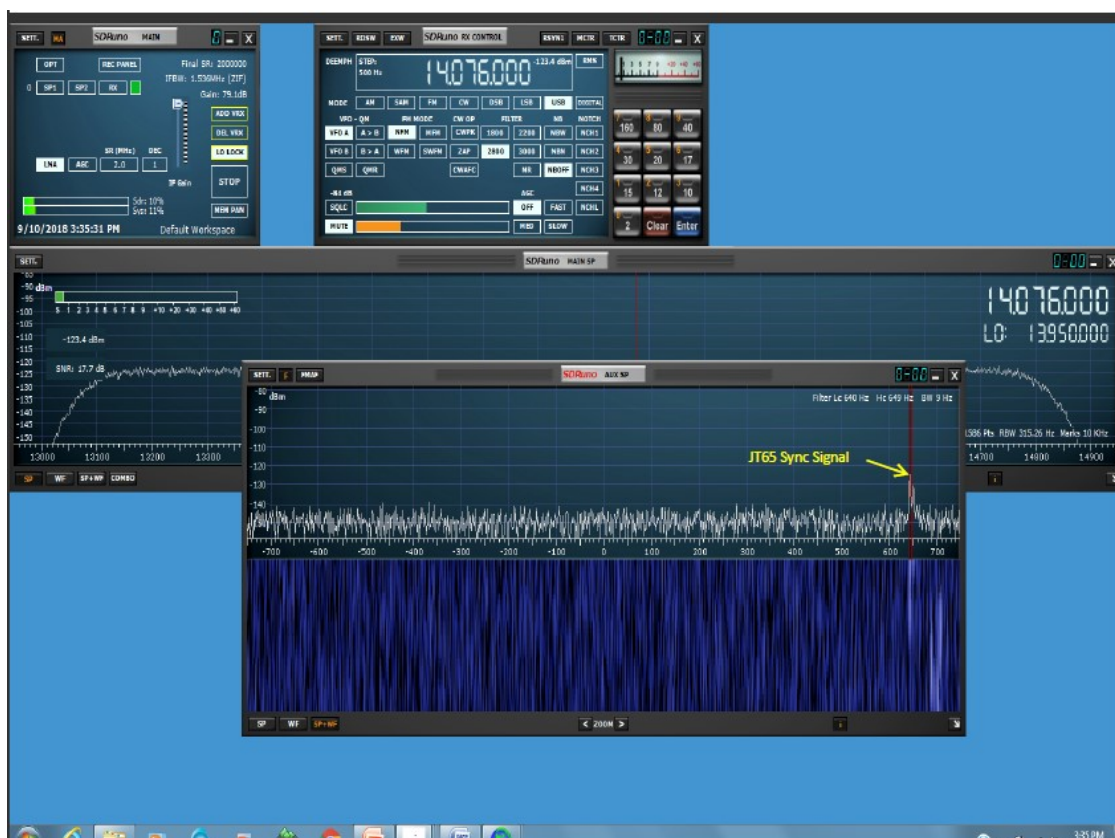
接收机噪声带宽也就是 = 179 Hz ，这时候 N_{PB} 显著减少了

$$(S_{PB} + N_{PB}) = -121 \text{ dBm}$$

这里 $S_{PB} = -121 \text{ dBm}$ $N_{PB} = -127 \text{ dBm}$

信号和噪声功率的测量，统统都在 179Hz 带宽内，接收机信噪比又一次显著受到 JT65 信号的影响，SNR 测量值=6dB，增加了 5dB, 相当于比前述测量提高了三倍。

下面，我将继续减小预设 SP2 带宽。也就是检波带宽，逼近 JT65 信号的同步子带，这里降到了 9HZ，参见下图。



SP2 预设接收机通带宽度= 9 Hz

接收机噪声带宽= 9 Hz 观察 S_{PB} 和 N_{PB}

N_{PB} 显著减小 ($S_{PB} + N_{PB}$) = -121 dBm

这里 S_{PB} = -121 dBm N_{PB} = -138 dBm

信噪比 SNR 的计算，又一次是 JT65 信号起主要作用

SNR 测量值 $\approx$ 17 dB 增加了 40 倍

什么是真正的数字模式信噪比

那么，什么是 FT8/JT9/JT65 的真正信噪比呢，什么数值能决定解码信息正确？

引入一个概念： 频移键控符号对噪声功率密度的比值 (E_s/N_0)，通常汉语说起来，是“符号信噪比”。（注意还有个 E_b 比特信噪比，咱们这么简单的通讯，就不用管它了）

(E_s/N_0) dB 能够从 SNR 数学计算得到

(E_s/N_0) dB = (SNR 报告) dB + (10 x LOG (2500 Hz/ (FSK 字符的检波带宽))) dB

JT65 字符带宽 BW = 2.692 Hz

JT9 字符带宽 $BW = 1.736 \text{ Hz}$

FT8 字符带宽 $BW = 6.25 \text{ Hz}$

对于 JT65 模式

$$(E_s/N_o)_{JT65} \text{ (dB)} = (\text{报告 SNR})_{JT65} \text{ (dB)} + (10 \times \text{LOG} (2500 \text{ Hz}/2.692 \text{ Hz})) \text{ (dB)}$$

公式中：

1) 2500 Hz 是接收机信号报告时的带宽

2) 2.692 Hz 是 JT65 实际占用的符号带宽，也就是检波带宽

公式简化为：

$$(E_s/N_o)_{JT65} \text{ (dB)} = (\text{报告 SNR})_{JT65} \text{ (dB)} + 29.7 \text{ dB}$$

类似地

$$(E_s/N_o)_{JT9} \text{ (dB)} = (\text{报告 SNR})_{JT9} \text{ (dB)} + (10 \times \text{LOG} (2500 \text{ Hz}/1.736 \text{ Hz})) \text{ (dB)}$$

$$\text{简化为: } (E_s/N_o)_{JT9} \text{ (dB)} = (\text{SNR}_{\text{reported}})_{JT9} \text{ (dB)} + 31.6 \text{ dB}$$

类似地：

$$(E_s/N_o)_{FT8} \text{ (dB)} = (\text{报告 SNR})_{FT8} \text{ (dB)} + (10 \times \text{LOG} (2500 \text{ Hz}/6.25 \text{ Hz})) \text{ (dB)}$$

$$\text{简化为: } (E_s/N_o)_{FT8} \text{ (dB)} = (\text{SNR}_{\text{reported}})_{FT8} \text{ (dB)} + 26 \text{ dB}$$

下图是本文汇总，展示了 50% 概率解码成功所需的最低信噪比要求：

JT65, JT9, and FT8 FSK Symbol-to-Noise Density Ratio $(E_s/N_o)_{dB}$ derived from Reported SNR			
Reported SNR (dB) over a 2500 Hz Noise Bandwidth	$(E_s/N_o)_{JT65} \text{ (dB)}$	$(E_s/N_o)_{JT9} \text{ (dB)}$	$(E_s/N_o)_{FT8} \text{ (dB)}$
-30	-0.3	1.6	-4
-29	0.7	2.6	-3
-28	1.7	3.6	-2
-27	2.7	4.6	-1
-26	3.7	5.6	0
-25	4.7	6.6	1
-24	5.7	7.6	2
-23	6.7	8.6	3
-22	7.7	9.6	4
-21	8.7	10.6	5
-20	9.7	11.6	6
-19	10.7	12.6	7
-18	11.7	13.6	8
-17	12.7	14.6	9

SNR threshold referenced to a 2500 Hz BW at a 50% probability for decoding a JT9 message in AWGN

SNR threshold referenced to a 2500 Hz BW at a 50% probability for decoding a JT65 message in AWGN

SNR threshold referenced to a 2500 Hz BW at a 50% probability for decoding a FT8 message in AWGN

JT65, JT9 和 FT8 的信噪比报告，基于 2500Hz 这么宽的噪声带宽，比起实际解码所需的带宽，太宽了

在信号实际带宽或检波带宽内得到的 SNR，是真实的，比起信号报告明显大

很多。

我们的业余无线电接收机，成功解调信号完全取决于在检波带宽内的噪声情况，无论是 CW/SSB/FM/BPSK31 等

为什么接收机的信号报告会基于 2500HZ 这么宽呢？

因为 SNR 是基于所有的业余模式，相当传统，也就是 2500HZ

因为 JT65/JT9/FT8 这些数字通讯模式通常使用标准的单边带 SSB 接收机，中频滤波大概是 2500HZ

参考文献

1. Work the World with WSJT-X, Part 2: Codes, Modes, and Cooperative Software Development, Joe Taylor, K1JT; Steve Frankie, K9AN, and Bill Somerville, G4WJS, ARRL QST, November 2017, Volume 101, Number 11.

2. Open Source Soft-Decision Decoder for the JT65 (63, 12) Reed-Solomon Code, Steven J. Frankie, K9AN and Joseph H. Taylor, K1JT, QEX, May/June 2016.

3. Work the World with JT65 and JT9, Digital Communication via Amateur Radio, Steve Ford, WB8IMY, JT65 and JT9 Protocol Specifics, by Dr Joe Taylor, K1JT, pg 1-6, ARRL Inc, ISBN: 978-162595-043-7