

浅谈无线电信号调制识别

上海聚星仪器有限公司

摘要: 本文通过数字无线电基带采集方法、调整识别算法和实践,讲述了完整的无线电调整识别流程。本文采用了国际电信联盟频谱监测推荐的方法,配合实践采集和仿真数据,验证了各种方法的可行性。本文还介绍了聚星仪器配合无线电监测和信号识别推出的高性能无线电接收机。

1 前言

广播、电视、通信、雷达……无线电信号在现实世界中随处可见。但是距离随时随地自由地通信这个理想还相当遥远。无线电监测管理就是在国际电信联盟(international telecommunication union——ITU,简称国际电联)框架和国家法律规定下,帮助人们接近这个理想的手段。而无线电监测管理的基本工作就是掌握异常无线电信号是什么、从哪里来、怎么办。无线电信号识别,就用来解决“是什么”的问题。长期以来,人们都希望可以自动进行识别,但是基本上都停留在学术研究水平。本文根据ITU推荐方法对算法构建的信号和实际空中的信号进行处理,初步尝试各种算法的信号识别效果。

2 原始信号获取

空中无线电波看不见,摸不着。无线电监测原始的方法就是接收并测量无线电频谱。然而频谱可以告诉你在什么频率有信号,而频谱反映的信号特征非常有限。现代无线电管理会

采用数字中频的无线电接收机,对感兴趣的信号基带进行采集和分析,来识别信号特征。简化的数字基带无线电接收机原理如图1所示。射频信号通过变频产生中频信号,经过中频带通滤波,送到ADC数字化。数字化后的波形进入数字信号处理模块。在

数字信号处理模块中将中频数字波形分别乘以余弦和正弦波形,再通过低通滤波,就可以还原出感兴趣的频点信号的基带信号。由于基带信号载波频率为0,时域波形体现为复数 $I(t)+jQ(t)$,所以通常称基带信号为IQ信号。

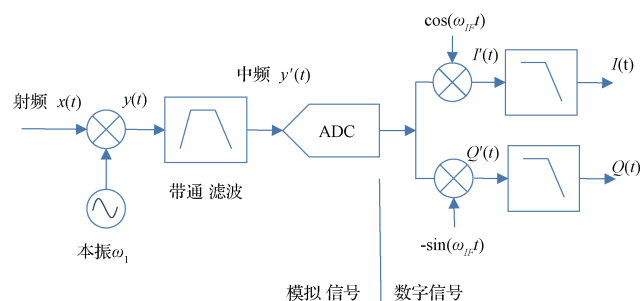


图1 简化的数字中频接收原理

根据复数域调制原理,基带信号 $s(t)$ 调制到载波频率 ω_0 的射频信号 $x(t)$ 可以用以下公式表达:

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{Re}\{s(t) \cdot e^{j\omega_0 t}\} \\ s(t) &= I(t) + jQ(t) \\ x(t) &= I(t) \cdot \cos(\omega_0 t) - Q(t) \cdot \sin(\omega_0 t) \end{aligned}$$

设中频混频输出 $y(t)$:

$$y(t) = x(t) \cdot \cos(\omega_1 t)$$

中频频率为 ω_{IF} :

$$\omega_{IF} = \omega_0 - \omega_1$$

经过简单计算可以得到 $y(t)$ 由 ω_{IF} 和 $(\omega_0 + \omega_1)$ 两个频率分量构成,通过中频滤波器去除高频分量,就只剩下 ω_{IF} 分量。 $Y(t)$ 的带通滤波输出 $y'(t)$:

$$\begin{aligned} y'(t) &= \frac{1}{2} [I(t) \cdot \cos(\omega_{IF} t) - \\ &Q(t) \cdot \sin(\omega_{IF} t)] \end{aligned}$$

可以认为通过混频滤波，射频下变频器将射频信号搬移到了一个较低的频率，方便数字化。在数字化以后，接收机进行数字下变频，得到基带信号。数字下变频是通过对 $y'(t)$ 乘以 $\cos$ 和 $\sin$ 波形通过低通滤波得到IQ信号的过程。

$$I'(t) = 2y'(t) \cdot \cos(\omega_{IF}t)$$
$$Q'(t) = -2y'(t) \cdot \sin(\omega_{IF}t)$$

简单推导可以得到：

$$I'(t) = I(t) + \frac{1}{2}[I(t) \cdot \cos(2\omega_{IF}t) - Q(t) \cdot \sin(2\omega_{IF}t)]$$
$$Q'(t) = Q(t) - \frac{1}{2}[I(t) \cdot \sin(2\omega_{IF}t) + Q(t) \cdot \cos(2\omega_{IF}t)]$$

将 I' 和 Q' 通过低通滤波器滤掉2倍中频频率的分量，就得到原始基带 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 。

这样恢复出的基带IQ波形含有原始发射信号的全部信息，可以在此之上进行各种信号分析提取丰富的特征，从而达到识别的效果。

3 信号处理和识别

根据国际电联的推荐，人们通常用如表1所示的方法提取调制信息，从而识别信号。

3.1 频谱自相关

对于信号做 L 个频谱 $X_i(f)$ 可以计算 L 次平均的自相关谱图：

$$C(f_1, f_2) = \frac{1}{L} \left| \sum_{i=1}^L X_i(f_1) \cdot X_i^*(f_2) \right|$$

这个谱图是二维曲面，可以用伪彩色图像表达。如图2所示，自相关谱曲面如左图，将它投影在 x - y 平面，用蓝-绿-黄-红渐变色表达信号由弱到

强，如右半图。这就伪彩色谱图。比71 dB，左下波形载噪比11 dB。两者的自相关谱图显示在各自时域波形的右侧。可以看到，信噪比降低

本文仿真生成了一段BPSK信号，如图3所示。其中左上波形载噪

表1 调制识别的方法和适用范围

调制类型	可测量	频谱相关和矩	N次方频谱	直方图	过零谱
幅度键控 (ASK)	载波频率	√			
	码速率		√ (N=2)		
	符号状态数			√	
频移键控 (FSK)	载波频率			√	
	码速率	√			√
	符号状态数		√ (N=1)*	√	
相移键控 (PSK)	载波频率	√	√ (N=2)		
	码速率		√ (N=2或4)	√	√
	符号状态数			√	
最小相位频移键控 (MSK)	载波频率		√ (N=2)		
	码速率		√ (N=2)		√
	符号状态数			√	
正交幅度调制 (QAM)	载波频率	√			
	码速率		√ (N=2)		√
	符号状态数		以上方法不适用		

* 与调制度有关

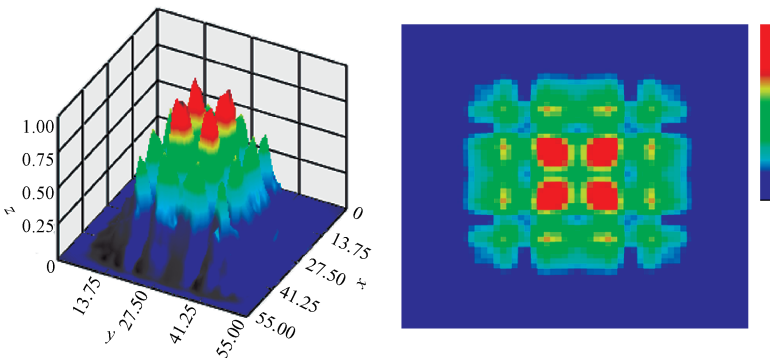


图2 伪彩色图像表述曲面

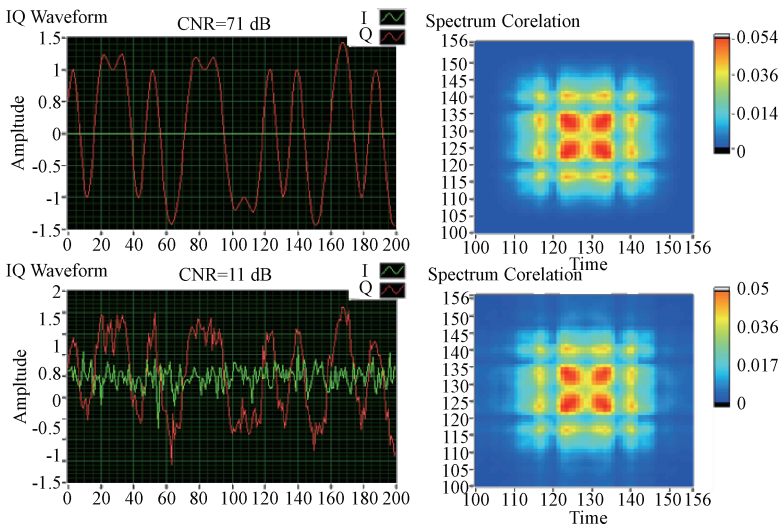


图3 不同信噪比BPSK的自相关谱图

对谱图影响很小。同样地,本文试验了其他参数,诸如频偏、脉冲成形滤波和少量码速率变化,都不敏感。也就是说码速率接近的BPSK信号频谱自相关谱图稳定不变。进一步试验调制方式变化,如图4所示。频谱自相关对不同调整方式敏感。也就是说这个算法对调制方式识别有较好参考价值。在实际操作时要

注意,频谱分辨率会影响谱图的采样分辨率,不恰当的分辨率会降低调制识别能力。

3.2 波形N次方的频谱

这个算法就是将基带波形做N次方然后分析频谱。这个算法对于调制和编码的频率敏感。简单来说,直接做(1次方)频谱,就可以看到FSK信号频偏数量;2次方频谱,可以分析

ASK码速率,PSK和MSK的载波和码速率;4次方频谱可以分析PSK和QAM的码速率。如图5所示为信息台的2FSK信号,直接做频谱,可以看到2个频率点上的峰值。对于CDMA基站下行信号,直接做频谱只是看到如图5(b)显示的宽带频谱,但是对基带信号做4次方后再做频谱,就显示出如图5(c)的峰值,这个特征峰表达了

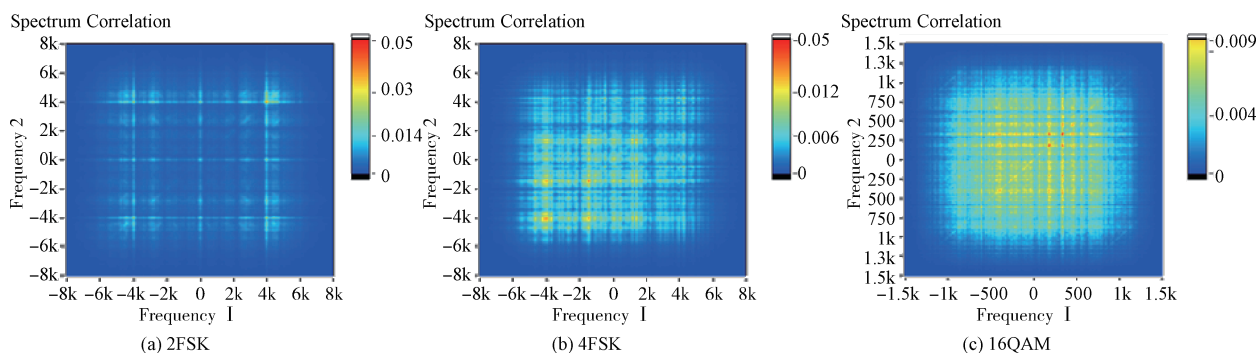


图4 不同调整方式的自相关谱图

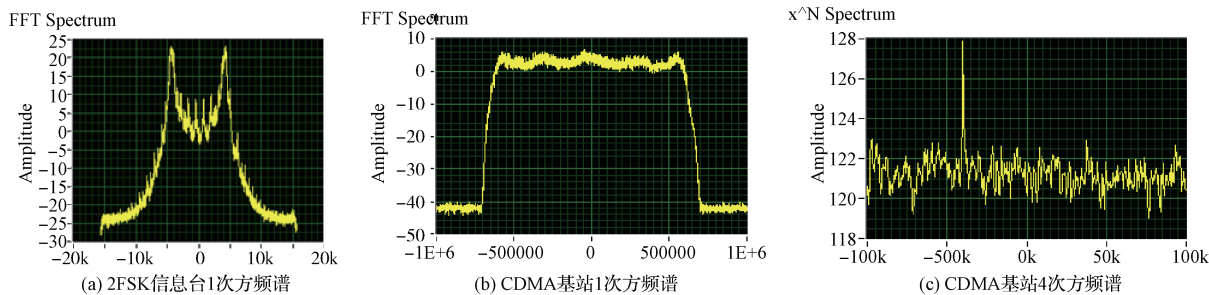


图5 不同信号N次方频谱比较

CDMA基站信号的特征。

3.3 直方图统计

对信号解调后,可以用直方图显示其调制特性。比如,对ASK信号解调幅,对FSK和MSK信号解调频,对PSK信号解调相,然后再做直方图统计,就可以看到调制符号的特征,比如ASK的符号数、FSK的载波和符号

数、PSK的符号数和符号速率、MSK的符号数。要注意的是对于PSK信号解调相,要消除载波频偏导致的相位线性漂移。

将信息台FSK信号按照调频解调,就得到频率随时间变化的曲线,将该曲线在频率轴上做直方图统计,就得到如图6所示直方图统计。可以在

左边的联合视频分析看到频率跳变有一些波动,所以在直方图里面可以看到2个频偏显示出一定扩散分布。直方图统计找到了符号频偏中心点4.20 kHz和-4.26 kHz。

3.4 过零频谱

过零频谱,是将采集来的原始时域波形过零点置1,其他置0,然后做

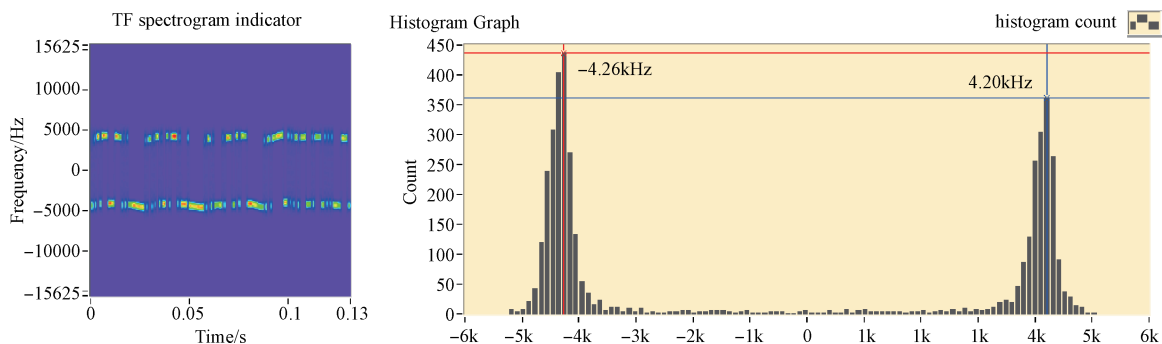


图6 信息台FSK信号的FM直方图统计

频谱。在频谱的峰值间隔可以反映出FSK、PSK、MSK、QAM的码速率。

如图7所示为一个QPSK信号的频谱和过零谱。这个QPSK采用升余弦脉冲成形滤波，2 000 Hz符号速率。可以在过零频谱上看到2 000 Hz处准确清晰的峰值。经过试验，不同滤波系数对过零谱影响不大。当信号有频偏时，载波频率不再是0，这时候码速率要看载波频率到码速率频率的间隔，而不是该峰值的绝对频率。

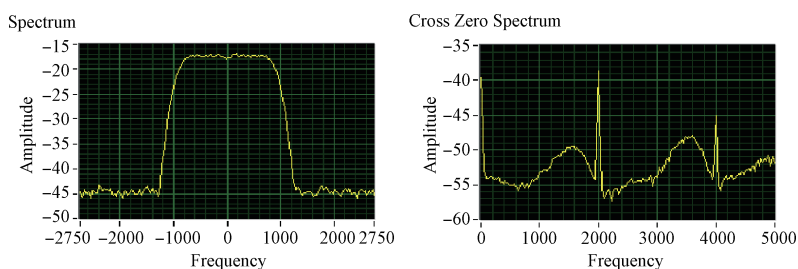


图7 QPSK的频谱和过零频谱



图8 聚星V3X-02搬移式接收机

4 应用实现

聚星仪器推出了基于软件无线电架构的高性能无线电接收机V3X。该接收机采用多级下变频器，将射频转换到中频，然后通过高性能中频处理器采集并处理成IQ基带信号。基带信号通过高速通用总线传给计算机，做频谱和各种分析，同时提供原始基带信号存储功能。用户可以对存储下来的基带信号进行深度分析和识别。

目前聚星仪器的接收机有多种款式，覆盖3.6 GHz和6 GHz两个频率范围，瞬时中频带宽20 MHz、40 MHz可选。如图9所示为一款可搬移型接收

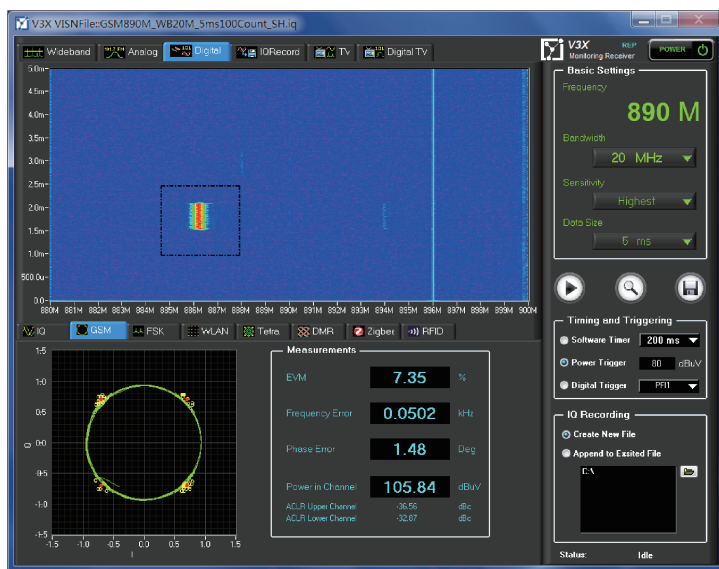


图9 聚星V3X软件数字解调及基带记录界面

(下转第11页)