

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.1600-3 建议书
(09/2017)

数字信号的技术识别

SM 系列
频谱管理



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率跨度限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R系列建议书

（也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REC/en>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明：该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2018年，日内瓦

© 国际电联 2018

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R SM.1600-3 建议书

数字信号的技术识别

(2002-2012-2015-2017年)

范围

本建议书介绍了数字信号技术识别的程序、方法和工具，从不同来源提供了一系列方法和工具，为不同案例推荐了应用。但并非所述的工具都需要使用以保证符合本建议书的要求。且本建议书未提供硬件或软件工具算法或设计特性的深入阐述。

关键字

信号识别、信号分析、数字信号

缩略语/术语表

ADC	模拟数字转换器
AM	调幅
ASK	振幅键控
CAF	循环自相关函数
CDMA	码分多址
EVM	误差矢量幅度
FDE	频域均衡
FDMA	频分多址
FM	调频
FSK	频移键控
GMSK	高斯最小偏移键控
GSM	全球移动系统
I/Q	同相和正交
OFDM	正交频分复用
PRF	脉冲重复频率
PSK	相移键控
QAM	正交调幅
QPSK	正交相移键控
SC	单载波
SCF	谱相关函数
SNR	信噪比
TDMA	时分多址
UWB	超宽带
VSA	矢量信号分析器

相关的国际电联报告

ITU-R SM.2304号报告

注 – 在所有情况下均应使用报告的最新版本。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 无线电使用的稳步增长；
- b) 数字信号正在得到广泛采用；
- c) 越来越多的装置可在无许可或认证程序的情况下使用，从而使主管部门难以确定发射来源；
- d) 多个无线电通信技术共享相同频谱是一个新兴趋势；
- e) 有关数字发射干扰的投诉往往难以解决；
- f) 技术识别通常是对许多数字通信系统所用复杂波形的数字信号进行一切测量的最重要前提；
- g) 现有的信号数据库可将现代数字信号与其各自的内外部参数相结合；
- h) 现有的新的分析和识别工具及技术可实现对未知信号性质的识别，或对现代数字标准的全面识别，

建议

- 1 应按以下顺序识别数字信号：
 - 以信号外部特征为基础的总体识别程序；
 - 在对信号的事先了解甚少/不全的情况下，根据信号内部特征（调制类型和其他内部波形参数）作出识别；
 - 在对信号具有充分事先了解的情况下，根据与已知波形特性的相关性进行识别；
 - 通过信号解调、解码和与已知波形特性的比较确认识别（如未在识别过程使用），
- 2 应使用附件1介绍的过程、方法和工具。

附件1

1 引言

本附件介绍了旨在独立或共同用于识别相关数字信号程序的步骤。此信息旨在提供有关标准现代数字信号处理的基本、实用和逻辑性意见。案文研究了信号外部参数的使用问题，就为更全面进行信号分析对信号内部参数做出分析给出建议，并描述了积极识别标准现代数字信号所用的软件工具和技术。本附件讨论的一系列工具可被用于数字信号的识别，但并非所述的工具都需要使用以保证符合本建议书的要求，事实上，某一特定监测服务可用的设备

并非包括所有这些工具。本附件讨论的工具和技术通常包括操作者和系统之间的交互，因为大多数系统不会自动执行数字信号识别程序。

虽然某些现代频谱分析器具有信号定性能力，但仍有许多分析已不具有适用于更先进数字内部要素分析的同相和正交（I/Q）信号数据的保存和提供能力。虽然本附件重点介绍矢量信号分析器和监测接收机，但在某些情况下也可能使用处理信号分析特性的频谱分析器和频谱监测系统。

2 数字信号和信号分析及识别的方法的定义

标准现代数字信号：这些信号通常包括以下调制方案和多种接入格式：

- 振幅、相位和频移键控（ASK、PSK、FSK），包括最小偏移键控（MSK）。
- 正交振幅调制（QAM）。
- 正交频分复用（OFDM）。
- 时分多址（TDMA）。
- 码分多址（CDMA）。
- （编码）正交频分复用（接入）（C）OFDM（A）。
- 单载波频分多址（SC-FDMA）。
- 单载波频域均衡（SC-FDE）。

分类；信号分类：信号的分类参照通过诸如频率规划、带宽、频谱形状、持续时间、占用（信号外部参数示例）、调制格式和符号率或波特率（信号内部参数示例）等参数特征分选信号的过程。分类过程不包括信号原始内容的确定，但旨在帮助操作者确定发射信号的设备类型。例如，该过程可提供信息以确定发射器是在上行链路还是下行链路，在控制信道还是业务信道。信号外部参数通常可通过频谱分析器进行测量，调制的分类通过需要I/Q时间序列数据和特殊的软件算法。在正确的设置和合适的条件下（足够的信噪比和采集时间等），调制的分类软件可自动工作以报告正确的格式和符号速率。然而，很多情况下，调制的分类需要本附件明确的步骤中所述的操作者介入。

信号识别、信号分析系统和软件：此类系统和软件可通过将信号波形与pre-amble、mid-amble、保护时间、同步化词、同步化音、培训序列、引导符号和编码、导频编码等大量已知形式的相关性和得出解调或去编码信号与广播频道信令数据等大量已知形式的相关性，提供现代数字信号确定性识别。

I/Q信号数据：I/Q是指同向和正交信号数据。产生于信号抽样的I/Q数据可保留信号包括的所有振幅、频率和相位信息。这可使信号以不同方法得到准确分析和解调，是一种通用的详细信号分析方法。

调制认知软件：这种软件可运行于原始I/Q或音频解调录制资料，并可判断以下信号特征：

- 中央频率和载波之间的频率间隔；
- 信号带宽；
- 信号时长和脉冲间歇时长（在有脉冲的情况下）；
- 调制等级：单一或多个载波，线性或非线性；
- 调制格式；
- 符号速率；
- 信噪比（SNR）¹；
- 信号特有模式（如同步化/先导音、保护时间、保护间隔、帧结构）。

矢量信号分析器（VSA）和VSA软件：VSA工具将超外差技术或直接转换硬件与高速模数转换器（ADC）及数字信号处理（DSP）、现场可编程门阵列（FPGA）或嵌入式常规可编程处理器（GPP）相结合，以进行快速、高清晰度频谱测量、解调和高级时域及频谱-时间-域分析。VSA尤其适用于对通信、视频和广播采用的猝发、瞬时或数字调制信号等复杂信号的定性，并可向用户提供采集有关信号、调制识别能力和上述信号识别能力等原始I/Q数据的能力。VSA软件或许能够或不能够控制物理接收机。但它在所有情况下都能使用户对来自接收机或文档的原始I/Q数据进行分析。

此外，VSA软件通常提供预置的配置或信号模板，用于解调或解码标准的数字通信格式（在第6节中列出）。用户可以方便地使用这些模板验证分析信号类型的格式，以确认其是否与某频段获得许可的信号类型的特性相匹配。用户亦可增加新的或修改现有的信号格式。

监测接收机：监测接收机从与它连接的天线截获的所有信号中选择无线电信号，并在接收机输出端再现无线电信号传送的信息，同时提供对信号详细特性测量的方便。这项工作通常通过以下两种方法之一完成：

- 接触信号链中的中间环节。或
- 通过录制或提供输出，在多数现代接收机中得出全面的振幅和相位特征（通常通过抽样和保存I/Q数据的方法）。

差错矢量幅度（EVM）：差错矢量是指理想参考信号和测得信号之间一特定时间的矢量差。换句话说，是在理想版的信号被剥离后剩下的残余噪声和失真。EVM是符号（或芯片）时钟过渡矢量经过时间推移的差错矢量平方根（RMS）值。

¹ 虽然这不是常见的调制参数，但它是调制识别软件经常提供的参数。

3 数字信号的识别步骤

3.1 评估信号外部参数

信号识别的第一步是利用最简单的方法，包括将信号的“外部”参数与监管机构注册的信号数据库和频率规划进行比较。信号外部参数包括：

- 中央频率和载波间频率间隔；
- 信号带宽；
- 频谱形态；
- 信号时长（在脉冲或间歇情况下）；
- 频移。

目检和相关的信号与监测服务许可证数据库的匹配为识别相关的数字信号提供了良好的开端。如果信号与所有外部参数吻合，极有可能无需进一步分析即可做出正确识别。

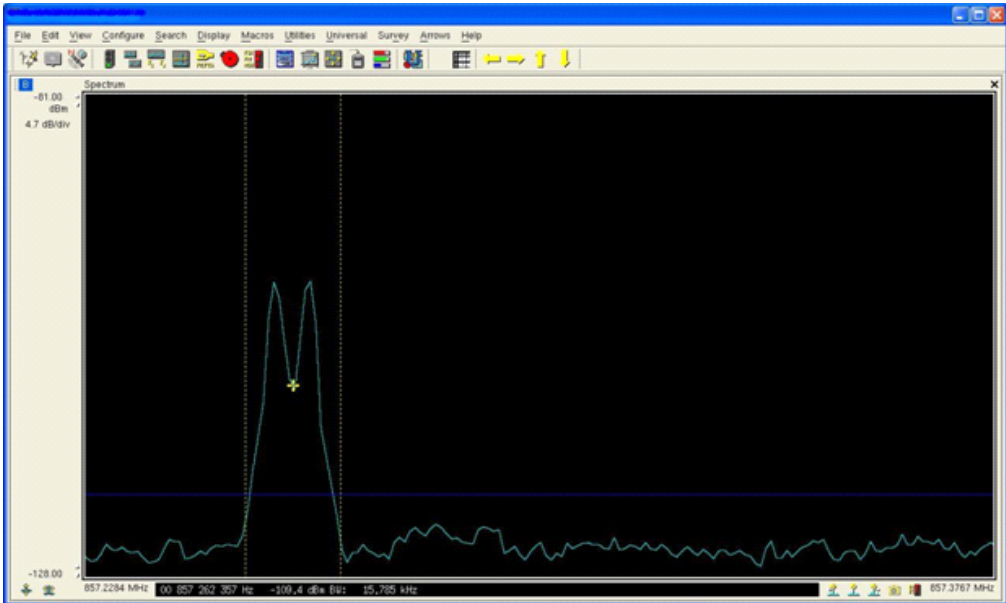
频率分配表示例见表1。该表全面介绍了获准在频段中运行的业务、操作参数、信号带宽和信道化情况。所有这些都可用于与信号外部参数的匹配，并可对相关信号的识别做出初步判断。

表1
频率规划示例表

频率规划表 698-941MHz (UHF) 29页					
国际表			美国表		FCC规划部分
1区表	2区表	3区表	联邦表	非联邦表	
(见前页)	698-806 固定 移动5.313B 5.317A 广播	(见前页)	698-763	698-763 固定 移动 广播 NG159	无线通信 (27) LPTV和TV转换器 (74G)
			763-775	763-775 固定 移动 NG158 NG159	公共安全陆地移动 (90R)
			775-793	775-793 固定 移动 广播 NG159	无线通信 (27) LPTV和TV转换器 (74G)
790-862 固定 除航空移动外的移动 5.316B 5.317A 广播	5.293 5.309 5.311A		793-805	793-805 固定 移动 NG158 NG159	公共安全陆地移动 (90R)
			805-806	805-806 固定 移动 广播 NG159	无线通信 (27) LPTV和TV转换器 (74G)

利用频谱分析器、矢量信号分析器或监测接收机、或者含有此功能的频谱监测系统，监测机构能够确定信号中心频率和相邻载波和信号带宽之间的频率间隔。应将频率与频率规划进行对照，以确保信号以划分信道之一为中心。此外，还需检查信号带宽是否符合相关频段的信道化标准。图1展示了怎样利用显示标识确定接收机输入端测得的中心频率、信号带宽和功率。

图1
标识显示频谱的示例



SM.1600-01

监测机构可利用表2提供的全套分析方法检测信号并评估信号外部参数。许多信号分析软件包都具有根据时间或频谱数据或一系列频谱数据进行数学运算的能力。这类数据包可被用于此类信号外部参数的评估。

表2

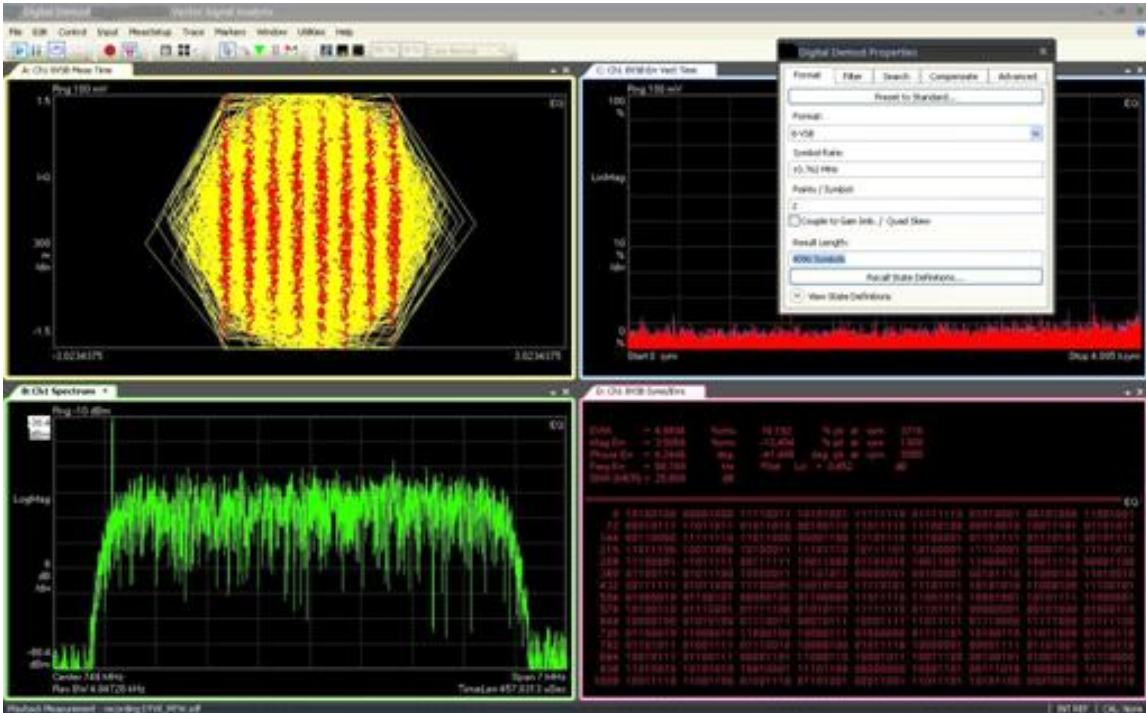
人工检测信号和提取外部参数的方法

需测量的参数	分析工具	调制类型	无线电环境
存在无线电通信信号	I-Q信号或瞬间振幅 A_i 与参考信号的相互关联	所有调制类型，特别用于已知的TDMA、CDMA和DSSS信号	所有
	功率频谱密度	所有调制类型	中高SNR
	自相关和循环自相关	OFDM、SC-FDMA、SC-FDE	所有
	频谱相关性分析	未知的DSSS和弱信号	所有
PRF或猝发长度	信号的振幅时间分析	OOK、雷达、IFF和其他突发信号	中高SNR
载波频率 子载波频率	功率频谱密度	所有调制类型	中高SNR
	瞬时频率 F_i 的柱状图	FSK	中高SNR
	瞬时频率 F_i 的平均值	FSK	中高SNR
	将I-Q信号频谱提高至 N 次方（ $=M$ (MPSK、4 (QAM)或用于CPM的 $1/h$)	PSK、QAM、CPM	正SNR
	频谱相关性分析	所有线性调制，特别是ASK、BPSK、QPSK	所有
	利用严格过滤将信号模块频谱提高至2或4次方	$\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK、SQPSK	正SNR 所有
发射带宽和信道化	功率频谱密度与掩模或有线函数函数的比较	所有调制类型	中高SNR
子载波间的频率间隔 (FSK偏移)	功率频谱密度。 和声搜索和/或和声标识	FSK、OFDM、COFDM	中高SNR
	瞬时频率 F_i 的柱状图	FSK	中高SNR

频谱形状：利用外部参数进行信号识别的另一个方法是评估频谱形状或特征标记。多数VSA软件程序都有标准现代数据演示库。这些演示能够使监测机构查看信号外部（和在某些情况下内部）参数，包括频谱形状、时长等。

有些发射对于传输类型具有独特性，引导音就是其中一例。部分数字高清电视传输在信号的低频端设置了引导信号。图2展示介绍了利用ATSC系统的电视传输（美国频段60，749 MHz）。请注意左下方具有引导信号存在的频谱痕迹和独特形状。该形状与中心频率和带宽相结合可指示传输类型。

图2
说明独特频谱形状的VSA显示



SM.1600-02

如有必要利用进一步的信号信息做出正确识别，就需要研究信号内部参数。

3.2 评估信号内部参数

在按第一小节所述对信号外部参数作出评估后，数字信号识别的下一步是分析相关信号的时域（或内部）特征。这将需要能够进行I/Q录制的VSA或监测接收机（或适用的频谱分析器）。信号内部参数包括：

- 调制格式（如QPSK、QAM、GMSK、FSK、PSK）
- 符号速率。符号速率有时亦称为波特率。

a. 进行I/Q录制：

- 设置中心频率：VSA或监测接收机应以作为已知信号发生源的频率为中心。
- 设置记录频率的范围：捕获记录频率的范围的设置应包括整个信号，但不要将其采集范围拓展到相邻频道。VSA或监测接收机显示器可用来测量中心频率和信号带宽。能够广播通信信号的VSA、监测接收机和示波器（除了一些超宽带广播系统）现在已经可用。

对于窄带信号而言，运营商应采用相应的带宽设置B。适用的B数值的范围是：

B = 100 Hz 至4 kHz（电报或电话带宽发射）

B = 15 至 45 kHz（中等带宽发射）

记录高带宽的信号要求带有信号处理器的更复杂的ADC或数字示波器。建议使用具有下述组件的系统：

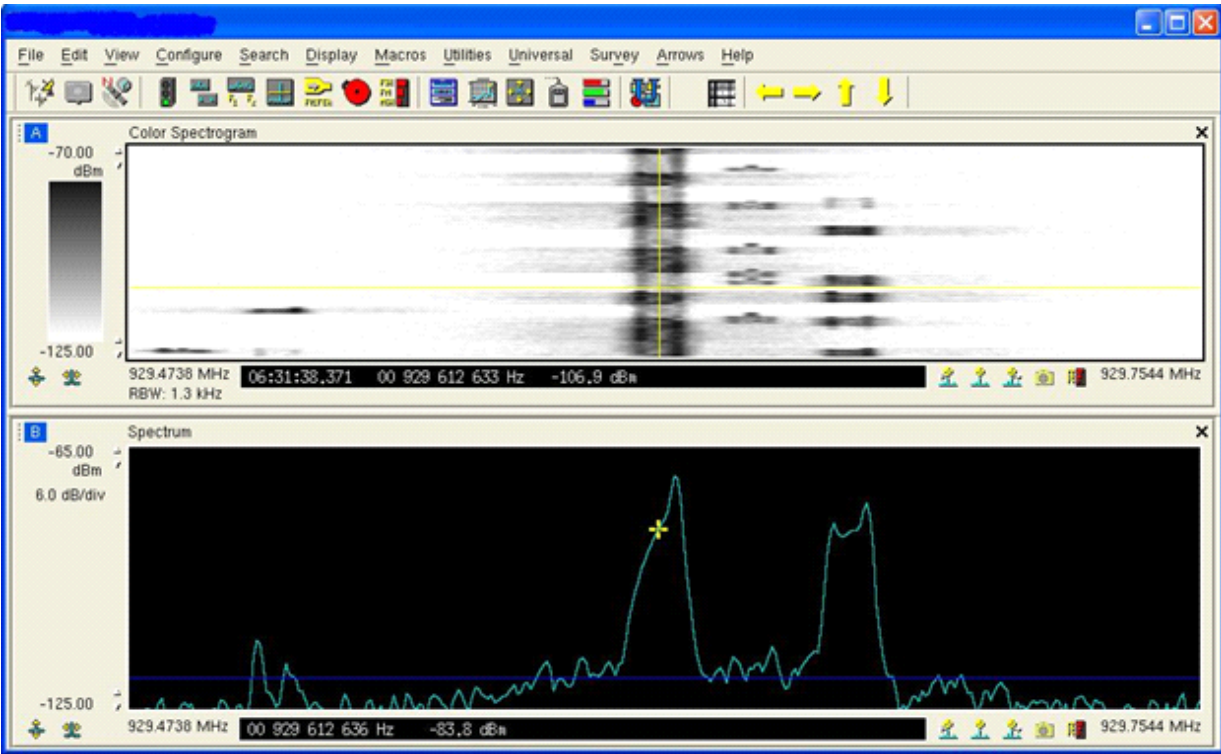
- 具有可微调中心频率、高动态范围和可调增益控制（50至60 dB）的模拟或数字接收机；
- 可提供以下条件的过滤器、基带转换器、模数转换器和录制设备：
 - 数值在14比特或更高；
 - 为每个数字调制符号提供4个以上抽样的抽样速率；
 - 为宽带信号提供几个微秒时长和几秒钟窄带的录制信号存储深度。

多数现代数字通信信号的带宽不足20 MHz，但也有些例外²。

- 录制时长的设置：通常只需短时录制（短于一秒钟）即可确定信号的调制格式和符号速率。VSA和监测接收机具有固定的信号录制存储器，因此较广泛的采集将在比获得窄信号更短的时间内填满采集存储器。在必要情况下，用户可在VSA上观察信号时长，以确保适当的录制长度，并最充分地利用采集存储器。
- 可利用光谱图或瀑布显示观察信号时长。这类频谱显示可在一个屏幕上（见以下的图3和图4）显示频率、功率和时间特征。信号功率是通过改变色彩或显示页面左侧彩柱所示的灰度色谱表示。随着时间推移，从下至上翻卷显示，目前的频谱痕迹显示在频谱图下方。

² 例如，用于近距离应用的WLAN通信标准（802.11ac和802.11ad）需要160 MHz至超过2GHz的带宽。

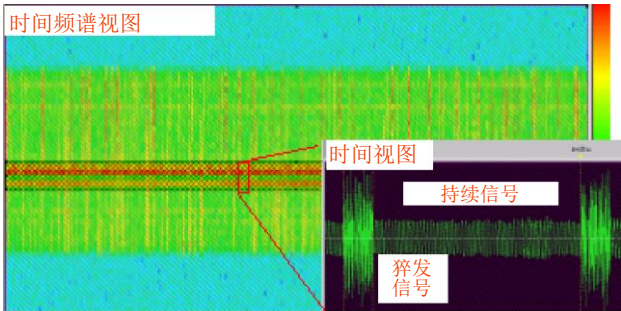
图3
显示频谱的频谱图示例



SM.1600-03

矢量信号分析软件可用于创建时间和频谱视图，以帮助监测机构了解相关频率的信号环境，并确定进行I/Q录制时的适当时长设置。必须采用相关的共频信号间隔技术，以确保对信号内部参数的有效分析。

图4
时间和频谱图（Y轴的频率/振幅和X轴的时间）：



SM.1600-04

- 触发录制：如果信号的占空因数低，IF幅度触发值可用于启动录制。IF幅度触发值是VAS和监测接收机的一个典型特性，能够使用户确定在I/Q录制启动时接受预先测出的IF功率电平。正确设置触发电频十分重要，它需要对相关频率的信号电平和噪声行为有所了解。触发电平设置过低可能导致录制频率跨度内部出现的噪声峰值启动录制。而触发电平设置过高则会导致所需信号的丢失。如果相关信

号为突发型或持续时间很短，应采用ADC存储器或延迟存储器在触发时间之前开始有效录制，并在信号下降或达到适当录制时长后终止录制。

- 检查录制波形：VSA软件允许用户立即查看录制信号，以确保采用适当的中心频率、已录制的频率跨度、时长和触发机制。

b. 了解信号内部参数

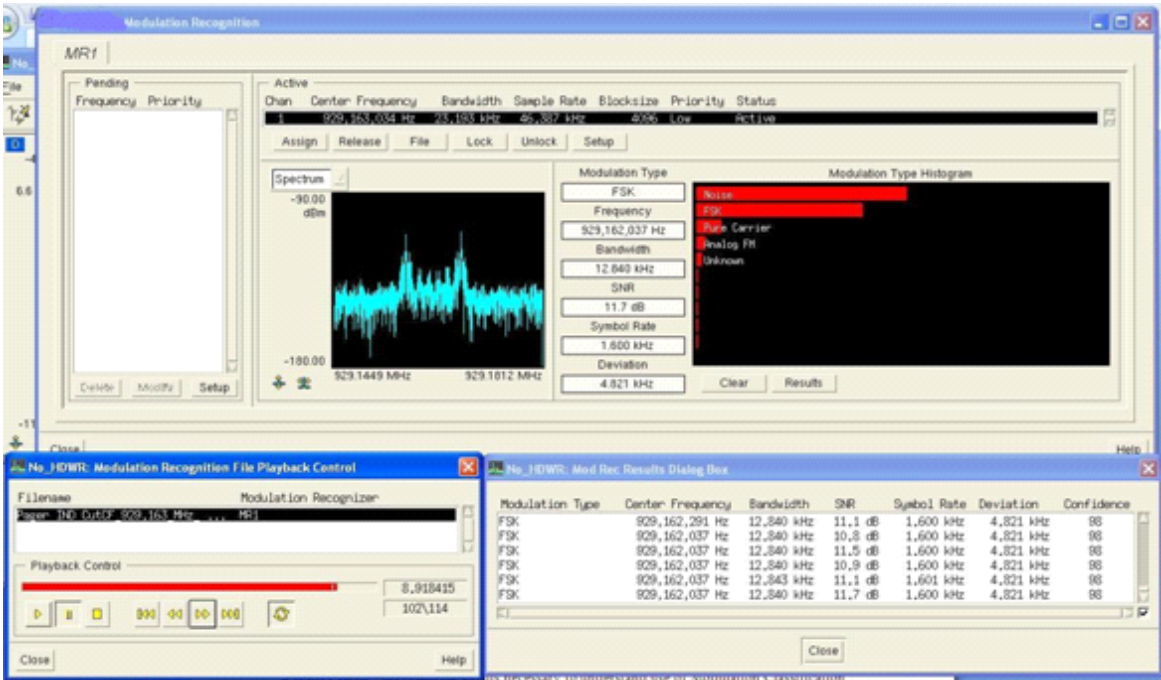
在成功进行I/Q录制后，用户可通过多种软件包“播放”信号，以了解信号的内部参数。不同厂商提供的VSA和监测接收机通过其含有中心频率、已录制的频率跨度、抽样速率、日期和时间等信号信息的专有标头录制原始I/Q数据。数据结构通常通过技术手册发布，可用于设置信号识别或调制认知软件。

为成功进行内部信号参数测量，必须为妥善录制进行软件设置。软件所需的调整通常包括：

- 中心频率；
- 抽样速率和信号带宽；
- 相邻信道过滤；
- 突发检测；
- 码组长度：这将确定为得出调制结果需要分析多少I/Q数据。例如，如果I/Q抽样为16K字节而码组长度设在2K字节，那么调制认知软件将在文档中对调制类型和符号速率8（八）倍作出评估。如果信号只出现在一小部分文档中，仅一个或两个测量就可能包括有用信息。

在图5中，进行的I/Q录制在调制认知软件包中播放，显示了非线性调制FSK。每个测量所用的码组长度为4K（或4 096），这一I/Q录制中共有114个码组（见视窗左下角）。延迟存储器被用于在触发信号前启动录制。因此，首批61个测量被归入噪声或纯载波类型。在信号首次出现并如前所述在16波特时被归类为FSK时，该程序暂停。

图5
调制认知软件示例



SM.1600-05

在我们处理了大多数I/Q录制材料后，具有1 600符号速率的FDK测量结果的数量增幅巨大。这从视图右上方所示的调制结果（红条图形）的柱形图便可看出。我们还看到，120个录制码组已得到处理。

在录制结束时，所有114个数据码组都得到处理，而且显示窗内已看不到信号。测量结果返回至噪声，但已有足够充足可用的信息可以被用来判断该信号为FSK、具有4.821 kHz偏差的1 600波特和大约11 dB的SNR。这一文档通过手工录制步骤每次1码组地得到处理。这项技术对分析程序提供了最大程度的控制并改善了识别短时间信号调制的概率。

表3就无商用信号分析软件或软件不适用于处理相关信号的情况下，利用数学运算提取信号内部参数的方法提供了进一步指导。

表3

手工提取信号内部参数的方法

需测量的参数	分析工具	调制类型	无线电环境类型
M调制 – 同步速率或同步调制速率 (符号速率)	瞬时振幅频谱 A_i	PSK (过滤或无过滤) 无过滤CPM或经严格过滤 QAM (过滤或无过滤)	中高SNR
	瞬时频率频谱 F_i 提高至 N 次方 ($N = 2$ (2FSK), 4 (4FSK))	FSK (无过滤)	唯一理想类型: 高SNR。 无多路径
	瞬时频率 F_i 的零交叉频谱	FSK (过滤或无过滤) PSK、QAM、MSK	唯一理想类型: 高SNR。 无多路径
	在频率的严格过滤后, 信号模块频谱提高至 N 次方 (=2或4或……)	PSK、QAM (过滤或无过滤) FSK (过滤或无过滤)	正SNR
	信号频谱提高至 N 次方 ($N = 1/h$)	CPM (过滤或无过滤)	正SNR
	信号频谱提高至幂 N 次方	$\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK、 SQPSK	正SNR
	自相关和循环自相关	OFDM、SC-FDMA、SC-FDE	所有
	频谱相关性分析	PSK、QAM、ASK、SQPSK、 $\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK	所有
	哈尔小波变换频谱	FSK	所有, 尤其是复杂多路径信道

表3 (结束)

需测量的参数	分析工具	调制类型	无线电环境类型
状态数量 (调制类型)	星群图/结合/盲均衡的矢量图 (如恒模算法 (CMA), Beneviste Goursat)	所有线性调制和主要PSK、QAM、ASK	中高SNR 复杂多路径信道
	频谱提高至 N 次方 ($N=2$ 、SQPSK和 $\pi/2$ DBPSK; $N=4$ 、 $\pi/4$ DQPSK)	SQPSK、 $\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK,	正SNR
	高分辨率功率频谱密度	OFDM、COFDM、多路复用	中高SNR
	瞬时频率 F_i 的柱状图	FSK	中高SNR
子载波或音的数量	功率频谱密度	所有调制	中高SNR
	瞬时频率柱状图 F_i	FSK	中高SNR
符号同步	可见图形 I/Q 、 $A_i F_i \Phi_i$ 矢量图	PSK&QAM过滤或无过滤	中高SNR
	可见图形 $A_i F_i \Phi_i$ 柱状图显示频率 F_i	FSK过滤或无过滤	中高SNR
	星群图、频率显示柱状图 F_i 和相位 Φ_i	CPM过滤或无过滤	中高SNR
	循环自相关	OFDM、SC-FDMA、SC-FDE	所有
	已知信号的互相关	TDMA、CDMA 多个OFDM和SC-FDMA以及 SC-FDE	所有

这些方法必须在它经历各种变化之后结合适当的信号表达方式，提取和验证信号特征。

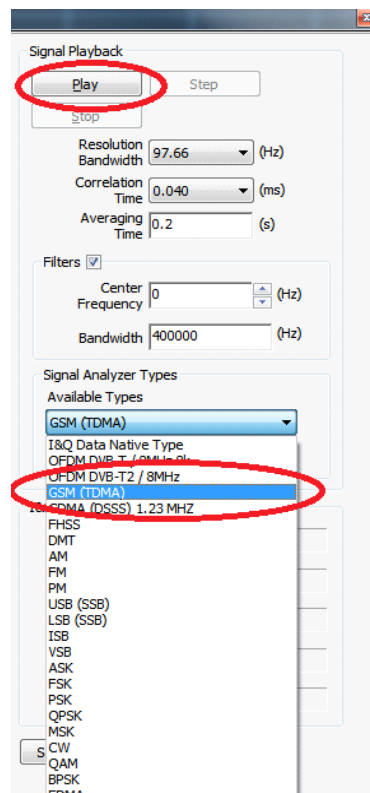
c. 信号分析和VSA软件中信号模板的使用

信号模板是应与特定信号预期测量结果共同使用的一系列或一套测量结果（如上节所述）。使用信号模板是另一种识别进程的方式。

VSA和其他信号软件工具使用模板进行一系列测量并在最终测量图中重点指出预期的输出结果。这些测量图可用于实现预期结果与选定信号格式实际测量值间的匹配。如果测量结果匹配，则可宣布它们之间具备匹配性。如无法比较，则可应用从库中提取的不同信号类型。

上述情况请参见下面的图示（基于2区的GSM系统）。此示例中的信号为879.6 MHz蜂窝基站至手机（下行链路）的信号，其目的是验证信号带宽为200 kHz的GSM信号。在VSA控制中，操作员从库中的模板清单内选择“GSM”信号类型。为开展GSM分析，VSA显示会自动配置，将GSM信号预期分析值用标记标出，即图6所示信号速率270.833 ksps和帧时长577 μ s。平均时间用于提升预期特性的可见性。

图6
GSM分析的VSA配置

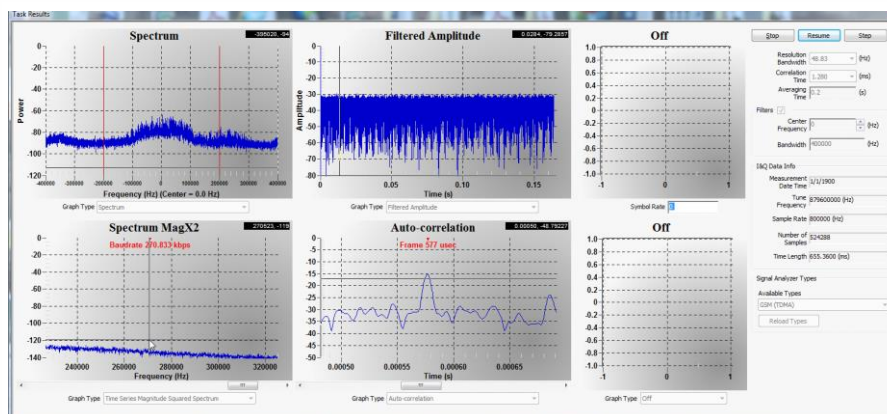


SM.1600- 06

按下“播放”按钮，将显示信号的测量值，如图7所示。

图7

GSM下行链路分析结果



SM.1600- 07

图中有三个窗口与GSM关系最为密切：

- 振幅平方频谱（频谱Mag X2）图：本图（相关频率被放大）为I/Q时间序列平方的FFT（亦见图7“频谱第2时刻的第2阶”）。振幅平方频谱的峰值集偏置约270 kHz，与270.833 kbps的GSM符号速率相对应。
- 滤波振幅：此图为信号振幅与时间之比经过滤波后的对数变化幅度，其中信号似乎每600微秒便会产生短时间的偏离。这与577微秒的GSM时隙对应。此现象将在自相关图中得到更明确的展示。
- 自相关：自相关图（亦被放大）用于及时寻找重复的模式。对此信号而言，在577微秒左右会出现强大的峰值。在此时长的倍数时点还会出现峰值，这属于GSM帧速率的特性。

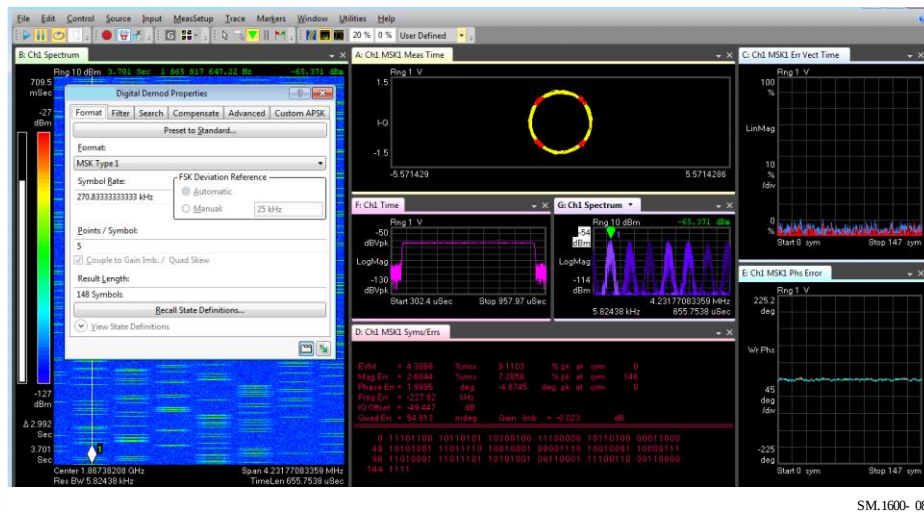
当频谱MagX2和自相关图显示出预计峰值时，信号特性与GSM的信号特性相吻合。

许多VSA工具提供加载标准信号模板和优化设置和显示的用于特定信号类别的方法。此外，这些工具可针对非标准化的格式定制测量的设置，并将其保存为一个新文件供将来调用。VSA工具通常允许使用表3中的数学函数创建定制的图表和显示方式。

另一预配置的GSM分析请见图8。在这种情况下，I/Q记录大致为4 MHz宽，位于GSM手机至基站（上行链路）频段，因此存在多个信道。如星座显示图所示，该频段内的各信号成功解调，EVM比例低且时隙长度正常。此显示的创建是通过将I/Q载入GSM模板并运行实现的。不需要额外的配置、集中或选择。但是，大多VSA工具允许I/Q进行集中和重新抽样操作，以便为分析隔离出一个单独的信号。

图8

GSM上行链路分析结果



有关调制格式、模拟和数字通信标准的一套标准VSA模板请参见本建议书的第4节（摘要）。VSA信号模板详细规范了恰当的数据预筛选和平均值的计算，各显示窗口图像类型的指配，指标预计峰值和信号特征窗口的标记设置。此方法为操作员提供了一种易于重复和解释的信号识别方法。

3.3 利用信号分析软件增进了解

前两个步骤揭示了相关信号的以下基本特征：

- 中心频率；
- 信号带宽；
- 信噪比；
- 持续时长；
- 调制格式；
- 符号速率。

通常，这一信息适用于通过相关区发布使用的频率划分表和通信系统技术规范匹配，确认信号类型。如果需要提供有关相关信号的进一步证据，可能需要对信号进行深入分析和解码。

矢量信号分析软件为多数现代数字通信格式提供了解码方案。这些解调和解码算法不会将I/Q的录制追溯至原始内容，而是比照理想模式对信号质量进行测量，以进一步提供正确识别I/Q录制内容的证据。

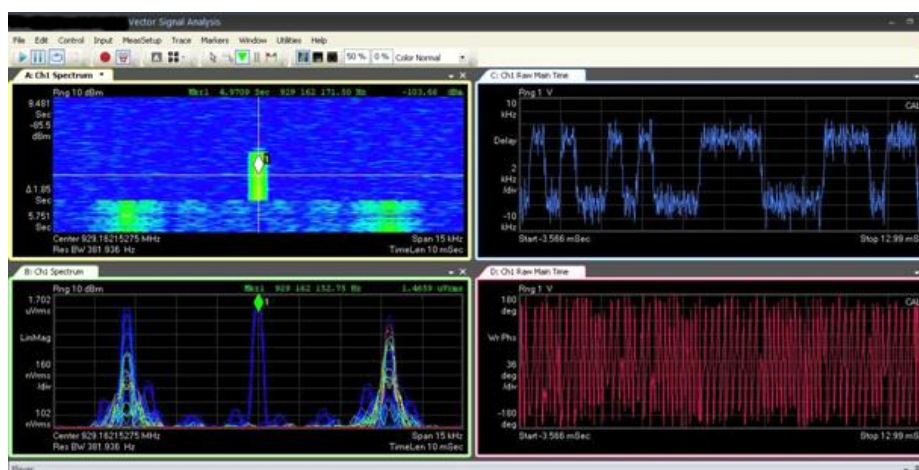
在需要对具体特定加以确认时，将需要信号解码软件包或互相关、自相关或交叉相关技术。已上市销售的商用解码程序包适用于部分但非全部现代通信格式。

a. 利用VSA软件查看I/Q录制内容

VSA软件向用户提供了多种不同信号分析视图。在图9中，VSA软件显示了与上述相同的信号。其左上方显示的频谱图为信号启动图 – 包括载波和调制信号的第一部分。图左下角显示了具有数字持续性的频谱，使用户能够结合更持久的传输问题观察短时间特征。右上角显示了群组时延或频率与时间的对比。由于这是频移键控信号，可以观察到发送的个体符号。右下方显示了相位与时间比 – 这在相关信号为相位调制的情况下尤为适用。

图9

VSA软件 – 信号分析窗口选编



SM.1600-09

读者应注意到，这一信号是以极低功率电平接收的。在接收机输入端测得的载波电平为 103.7 dBm。因此，右上角的痕迹（显示FM波形）出现了巨大噪声。由于VSA软件正在进行I/Q数据的录制，可利用信号功率、频率和相位信息进行测量。

b. 通过利用VSA进行的I/Q录制解调以确认认知和发现

建议将用于非线性和线性调制类型与信道平衡的各种算法相关并通过图表和显示对解调融合进行评估的多种数字解调器放入同一分析工具。

继续以前一I/Q录制工作为例，我们可利用VSA软件的数字解调能力认证相关信号的调制格式和符号速率。通过将VSA软件置于数字解调模式，我们就可输入前一步骤确定的具体调制模式（2级FSK）和符号速率（1600），以确认信号的内部参数。

在显示非线性FSK信号实例的图10中，左上部的痕迹显示了具有两个信号频率状态的I/Q（或极化）图–左侧状态（红点）代表符号“0”，而右侧状态代表符号“1”。如果你正确地确定了调制格式和符号速率，这一I/Q痕迹应极其平稳，而且红点（或状态）也被置于适当的域中。这一融合表示选择了正确的解调值，并采用适当的过滤和平衡。

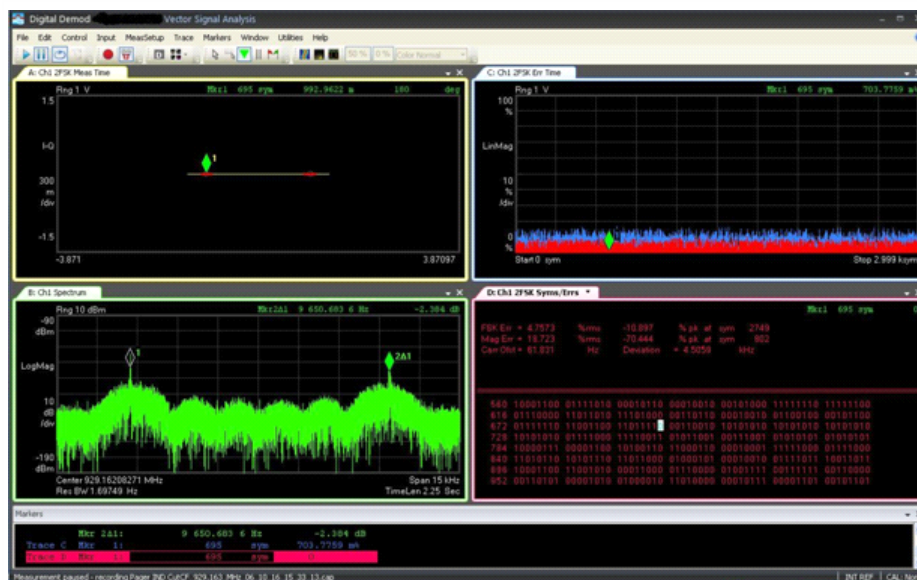
左下部的痕迹为多个解调信号综合的信号频谱图 – 在此情况下解调的符号达3000个。这一频谱显示应与最初看到的信号极相匹配。

右上部的痕迹显示了解调的各符号的误差矢量幅度（EVM）。EVM可根据各符号的具体情况被视为总体平均值。鉴于所有与这项调制相关的误差值都在1%之下，我们坚信与此信号相关的比特处于良好状态。

右下方的痕迹总结性地显示了实际的解调比特和误差。请注意，4个痕迹的标识都显示与3000的#695符号相关的符号“0”相关联。当你沿I/Q录制移动标识时，它们可向用户提供解调设置正确的反馈意见。

图10

VSA软件 – 数字解调工具



SM.1600-10

3.4 I/Q录制内容的处理

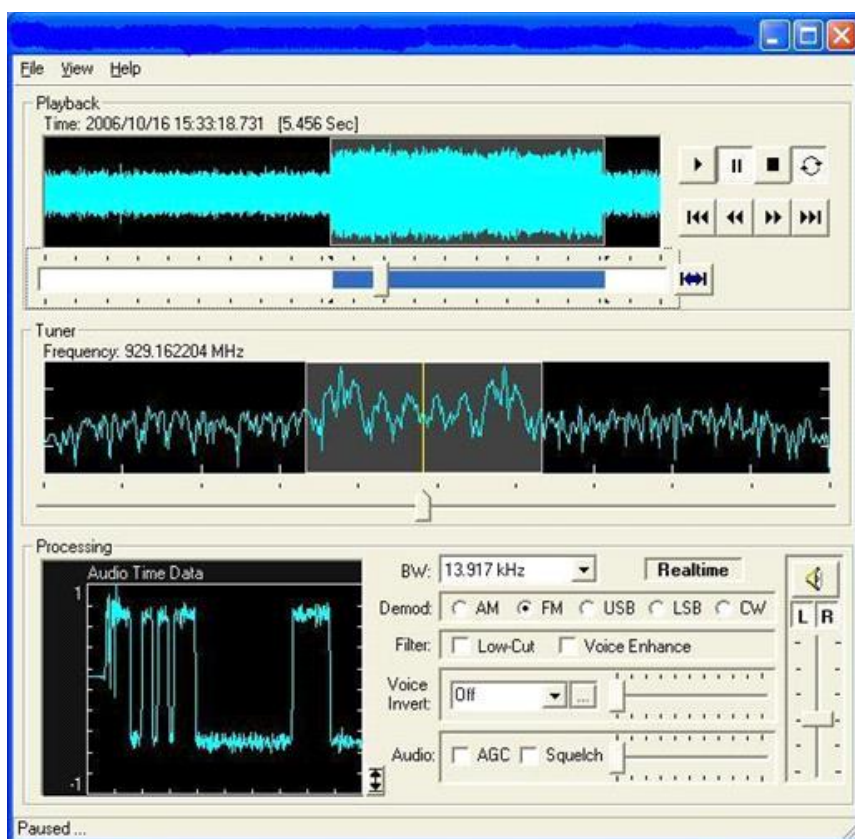
对未知数字信号的技术识别的最后一步是通过不同的硬件和信号软件工具进行I/Q录制内容的解码，以部分或全部地提取原始内容。这一步骤应根据有关信息使用的法律和伦理限制规定进行。以我们为例，可利用商用解码软件处理同样的I/Q录制内容，以便有把握地确认发射源。

a. 利用音频解调软件进行处理

某些解码软件可通过处理按标准格式（AM、FM、U/LSB或CW）解调信号而生成的视频信号运行。在此种情况下，将需要可生成音频的软件程序。图11所示程序便是一例。该程序将启动I/Q录制工作，并输出音频。由于录制内容过去未经“AM或FM检测”，该程序允许用户调整解调程序的中心频率和带宽。这使利用解码算法开展的对于中心频率和音频信号跨度高度敏感的解码算法工作获得了灵活性。

图11

I/Q音频播放器软件示例



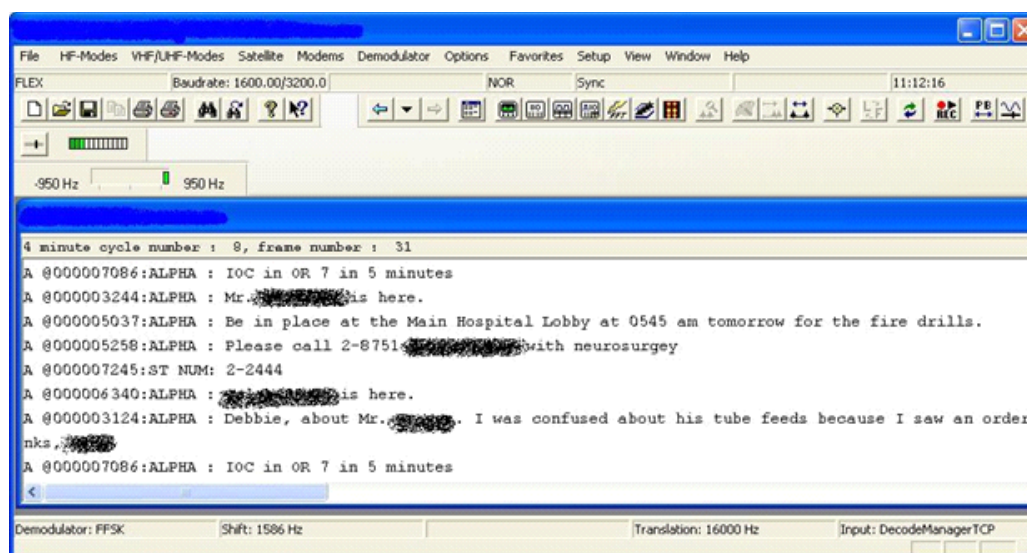
SM.1600-11

利用I/Q录制内容开展工作的另一优势是能够利用不同的监测方案，获得最佳解码音频质量。这种灵活性减少了开展“实地工作”的运营商的焦虑感。如果录制的I/Q波形的中心频率偏离中心，可通过录制的重新取样和/或回归中心（如上所示）取得良好结果。

b. 利用信号解码软件进行处理

信号解码软件将对录制内容采用选择的方案，并将结果输出到窗口或存储在文本文档中。通常要对每个解码方案进行多次调整。部分这些程序包括“信号识别符”，但它们通常用于FSK或PSK等极为简单的调制方案。在以下的实例中，I/Q录制内容被输入解码方案，而格式被确定为FLEX和POCSAG，即两种常用的寻呼信号。这些格式的选择是基于中心频率（929.162 MHz）、带宽（12.5kHz）– 或信号外部参数和调制格式（FSK）及符号速率（1600）– 或信号内部参数。POCSAG不产生解码结果。FLEX解码结果见下图。

图12
可供商用的解码软件示例



SM.1600-12

从原始发射提取的信息内容将使用户能够确认来源，并在有充足证据的情况下采取适当监管行动。

3.5 相关性和其他先进方法

本节旨在描述检测机构可为数字信号识别采用的先进算法。

a. 相关性方法

交叉相关性：交叉相关性旨在测量用于其时延函数的两种波形的相似性，亦被称为滑点积或滑内积。

自相关性：自相关性是信号自身的交叉相关性。从非正式角度看，它是期间时间间隔函数观察的相似性，也是发现存在被噪声淹没的周期信号等重复模式或通过谐波频率暗示的信号中缺失的根本频率的数学工具，通常被用于分析功能或时域信号等系列数值的信号处理。

采用这些算法可以检测和识别作为已知参考信号用于进一步处理的嵌入性周期性序列。

这些算法通常被用于为较短和已知的特性（例如pre-amble或mid-amble、同步化同步字或引导码）搜寻长周期信号。实际上，这些在标准数字波形中得到调制的已知特性，提供了可用于单独相关信号分类的模式：

- 许多标准持续波形都具有同步字（在许多无线电、寻呼和PMR（NMT、TETRAPOL等）中遇到的频分复用（FDM）和频分多址（FDMA））。
- 可在TDMA标准化波形中看到培训序列，例如在多个2G蜂窝和PMR（GSM、D-AMPS、TETRA、PHS）中遇到的波形。

- 经常在3G蜂窝系统（3GPP/UMTS、3GPP2/CDMA2000）遇到的标准化CDMA或TDMA/CDMA波形等中出现的先导码或同步字。
- 经常在无线电广播系统（DAB、DVB-T/H）和4G蜂窝系统（3GPP/LTE）遇到的OFDM、OFDMA、COFDM和SC-FDMA/SC-FDE调制信号中出现的先导符号或先导散射子载波。

这些技术的实际部署需要使用滑动时域窗，以确定信号的到达时间，还利用多普勒压缩技术补偿信号源的移动。总而言之，这些方法采用两个步骤：

步骤1：评估多普勒频率误差和时间同步瞬间。

步骤2：纠正多普勒频率误差并优化检测和源间隔。

b 其他先进方法

*Haar*小波变换：“借助这一方案，能够利用事先已知参数对无线通信信号进行自动调制分类和认知。这一过程的特点在于能够动态适应近乎所有调制类型，并具有识别能力。根据小波变换和统计数据参数，这一制定的方案被用于确定M-ary PSK、M-ary QAM、GMSK和M-ary FSK调制。模拟的结果表明，正确调制识别可达到5 dB的下界。根据混淆矩阵³对识别率进行分析。当SNR超过5 dB时，建议系统检测的概率高于0.968。将建议的方案性能与现有方法相比较发现，它将能利用低SNR识别所有数字调制方案。”（见参考[1]）。

频谱相关性分析：因为抽样、调制、复用和编码等运算，许多通信系统使用的信号都呈现其二阶统计参数的周期性。这些被称为频谱相关性特性的循环平稳特性，可用于信号的检测和认知。为对信号循环平衡特性进行分析，通常需要采用两项主要功能：

- 1) 循环自相关功能（CAF）用于时域分析；以及
- 2) 显示频谱相关性并从循环自相关性傅里叶转换得出的频谱相关性功能（SCF）。

可根据SCF和SCC等多个特征参数区分不同类型的信号（如AM、ASK、FSK、PSK、MSK、QPSK）。这一算法也适用于弱信号，而且可用于未知信号的分类。（见参考[2]）

4 总结

本建议书提供的示例阐明了识别过程、商用软件工具的使用以及深入了解现代数字信号的技术。提供的相关性实例介绍了可用于识别复杂信号的先进处理技术。

³ 在人工智能领域，混淆矩阵是能够使算法性能视觉化，通常是监督下学习矩阵（在未加监督学习当中，它通常被称为匹配矩阵）的具体图表格式。矩阵的每一栏代表预测级别的实例，而每一行则代表实际类别的实例。其名称源于它便于观察系统是否将两个类别混淆（如通常将一个的标签误认为另一个）。在人工智能之外，混淆矩阵通常被称为相依表或误差矩阵。

近年来，在信号分析器和监测接收机中进行I/Q录制的能力越来越普及。信号分析、调制识别和信号识别工具也变得更易于获得和更具价格可承受性。这些工具使频谱监管机构提高了发现、记录、分类和识别相关数字发射的自动化程度，并提高了识别和缓解干扰引发问题的有效性。

5 参考文献

5.1 有关软件工具的参考

通常得到VSA软件支持的解调方案：

- FSK：2、4、8、16级（包括GFSK）；
- MSK（包括GMSK）类型1、类型2；
- CPMBPSK；
- QPSK、OQPSK、DQPSK、D8PSK、 $\pi/4$ DQPSK；
- 8PSK、 $3\pi/8$ 8PSK（EDGE）、 $\pi/8$ D8PSK；
- QAM（绝对编码）：16、32、64、128、256、512、1024；
- QAM（每DVB标准差别编码）：16、32、64、128、256；
- Star QAM：16、32；
- APSK：16、16 w/DVB、32、32 w/DVB、64 VSB：8、16、定制APSK。

通常得到VSA软件支持的标准数字通信格式：

- 蜂窝：CDMA（基础）、CDMA（移动）、CDPD、EDGE、GSM、NADC、PDC、PHP（PHS）、W-CDMA、LTE、LTE Advanced；
- 无线网络：蓝牙TM、HiperLAN1（HBR）、HiperLAN1（LBR）、IEEE 802.11b、ZigBee 868 MHz、ZigBee 915 MHz、ZigBee 2 450 MHz；
- 数字视频：DTV8、DTV16、DVB16、DVB32、DVB64、DVB128、DVB256、DVB 16APSK、DVB 32APSK；
- 其他：APCO 25、APCO-25 P2（HCPM）；APCO-25 P2（HDQPSK）、DECT、TETRA、VDL模式3、MIL-STD 188-181C：CPM（选项21）。

5.2 参考文件

- [1] PRAKASAM P. and MADHESWARAN M., Digital modulation identification model using wavelet transform and statistical parameters, Journal of Computer Systems, Networks, and Communications Volume 2008 (2008), Article ID 175236, 8 pagesdoi:10.1155/2008/175236
- [2] HAO Hu, JUNDE Song, Signal Classification based on Spectral Correlation Analysis and SVM in Cognitive Radio, 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications, Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication and Yujing Wang, Dept. of Telecommunication Engineering, Xidian University