

国 际 电 信 联 盟

**ITU-R**

国际电联无线电通信部门

**ITU-R SM.1600-1 建议书**  
(09/2012)

**数字信号的技术识别**

**SM 系列**  
**频谱管理**



## 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，不受频率范围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                     |
|------------|------------------------|
| <b>BO</b>  | 卫星传送                   |
| <b>BR</b>  | 用于制作、存档和播出的录制；电视电影     |
| <b>BS</b>  | 广播业务（声音）               |
| <b>BT</b>  | 广播业务（电视）               |
| <b>F</b>   | 固定业务                   |
| <b>M</b>   | 移动、无线电定位、业余和相关卫星业务     |
| <b>P</b>   | 无线电波传播                 |
| <b>RA</b>  | 射电天文                   |
| <b>RS</b>  | 遥感系统                   |
| <b>S</b>   | 卫星固定业务                 |
| <b>SA</b>  | 空间应用和气象                |
| <b>SF</b>  | 卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调 |
| <b>SM</b>  | <b>频谱管理</b>            |
| <b>SNG</b> | 卫星新闻采集                 |
| <b>TF</b>  | 时间信号和频率标准发射            |
| <b>V</b>   | 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  
2013年，日内瓦

© 国际电联 2013

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.1600-1建议书

## 数字信号的技术识别

(2002-2012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，提供了方法和工具的比较，为不同案例推荐了应用，并深入阐述了硬件或软件工具的算法或设计特性。

## 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（调制类型和其它内部波形参数）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，
- 2 遵循附件1介绍的程序。

## 附件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。案文研究了外部信号参数的使用问题，就为更全面进行信号分类对内部信号参数做出分析，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。

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仪和监测接收机，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仪。

### 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模式：

- 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）。

信号识别系统和软件：此类系统和软件可通过信号波形与pre-amble、mid-amble、保护时间、同步化词、同步化音、培训系列、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。

调制识别软件：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)<sup>1</sup>;
- 信号特有模式 (如同步化/先导音、保护时间、保护间隔、帧结构)。

矢量信号分析仪 (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。

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)。

差错矢量等级: 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。

## 数字信号的识别步骤

### 1 评估信号外部情况

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。外部信号参数包括:

- 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。

目检和匹配监管机构注册数据库感兴趣的信号, 是识别相关数字信号的良好开端。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。

---

<sup>1</sup> 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。

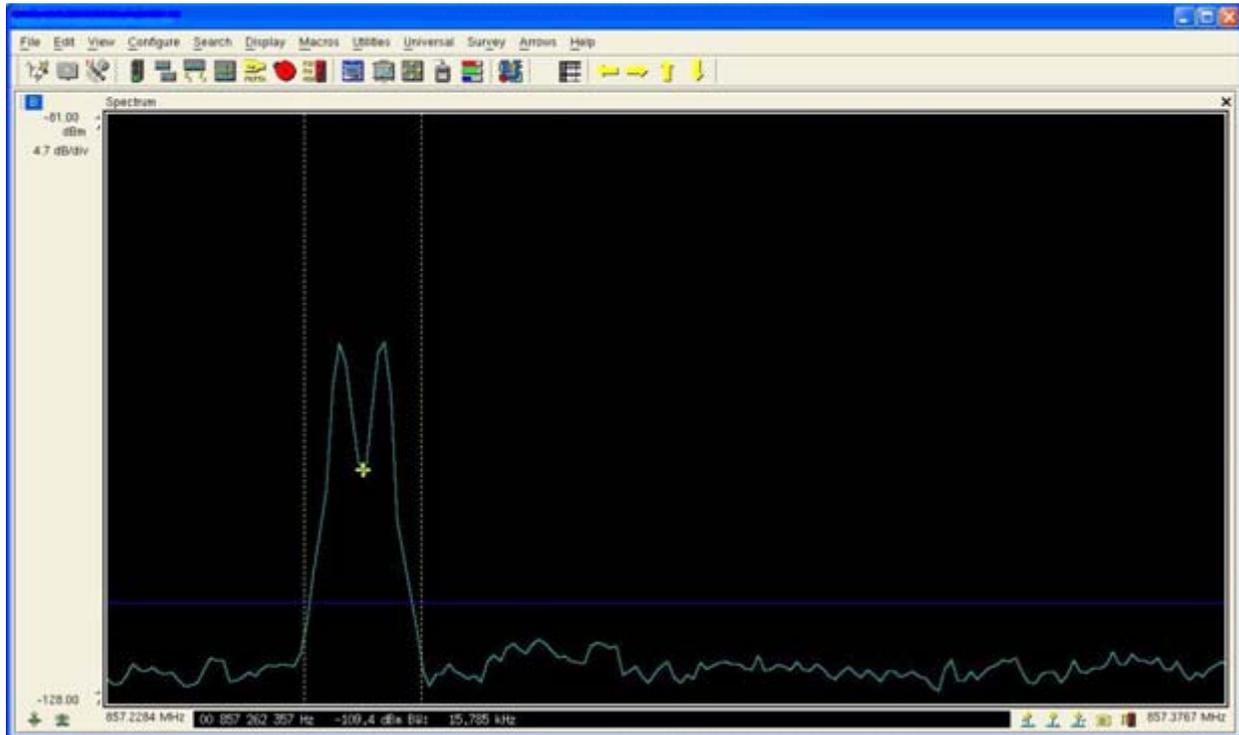
频率分配表示例见表1。该表全面介绍了获准在频段中运行的业务、操作参数、带宽和信道化情况。所有这些都可用于与外部信号参数的匹配，并可对相关信号的识别做出初步判断。

表1  
频率划分示范表

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

利用频谱分析仪、矢量信号分析仪或监测接收机，监管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

监管机构可利用表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

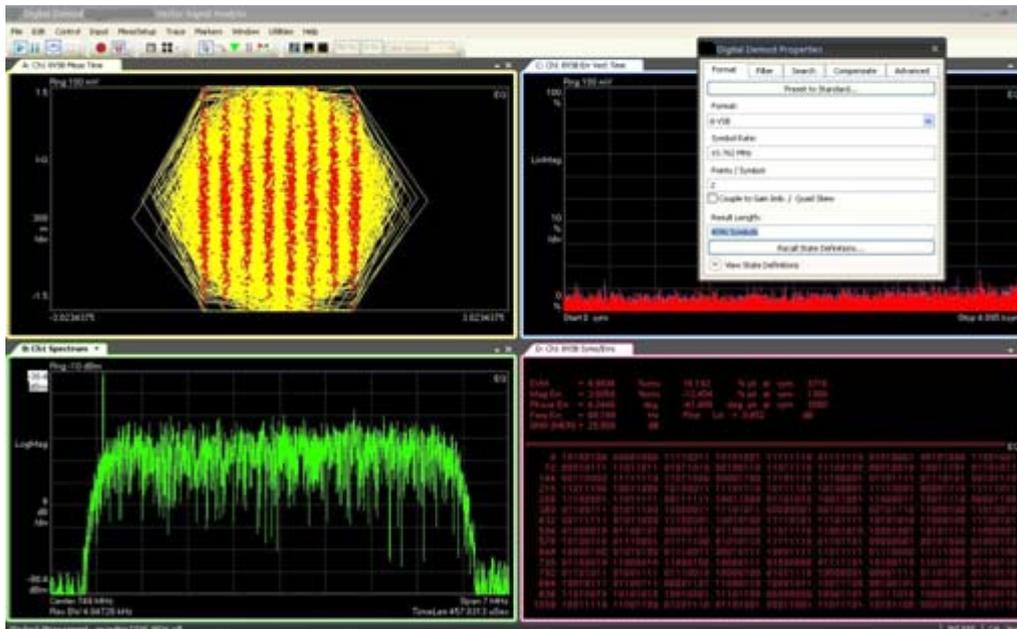
人工检测信号和提取外部参数的方法

| 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         |
|                      | 频谱功率密度   | 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和其它突发信号                  | 中高SNR      |
| 载波频率<br>子载波频率        | 频谱功率密度   | 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字方                              | $\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK、SQPSK | 正SNR<br>所有 |
| 发射带宽和信道化             | 频谱功率密度与掩模和有线线函数的比较                                 | 所有调制类型                             | 中高SNR      |
| 子载波间的频率间隔<br>(FSK偏移) | 频谱功率密度。<br>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。这些演示能够使监管机构查看信号外部（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有把握的识别，就需要研究内部信号参数。

## 2 内部信号参数的评估

在按第一段所述对外部信号参数做出评估后，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（或适用的频谱分析仪）。内部信号参数包括：

- 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或监测接收机应以做为已知信号发生源的频率为中心。
- 设置带宽：捕获带宽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带宽。VSA和监测接收机提供的捕获带宽在1 kHz至160 MHz之间。

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）

如表3所示，采用典型的信道带宽值（B）外加适当的余地（10至50%），同时允许利用数字过滤和信号调节算法进行后处理。

较高的带宽信号捕获需要更高级的ADC和具有信号处理器的数字示波器。建议采用具有以下组件的系统：

- 具有可微调中心频率、高动态范围和可调增益控制（50至60dB）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、模拟至数字转换器和录制设备：
  - 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<sup>2</sup>。

---

<sup>2</sup> 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。

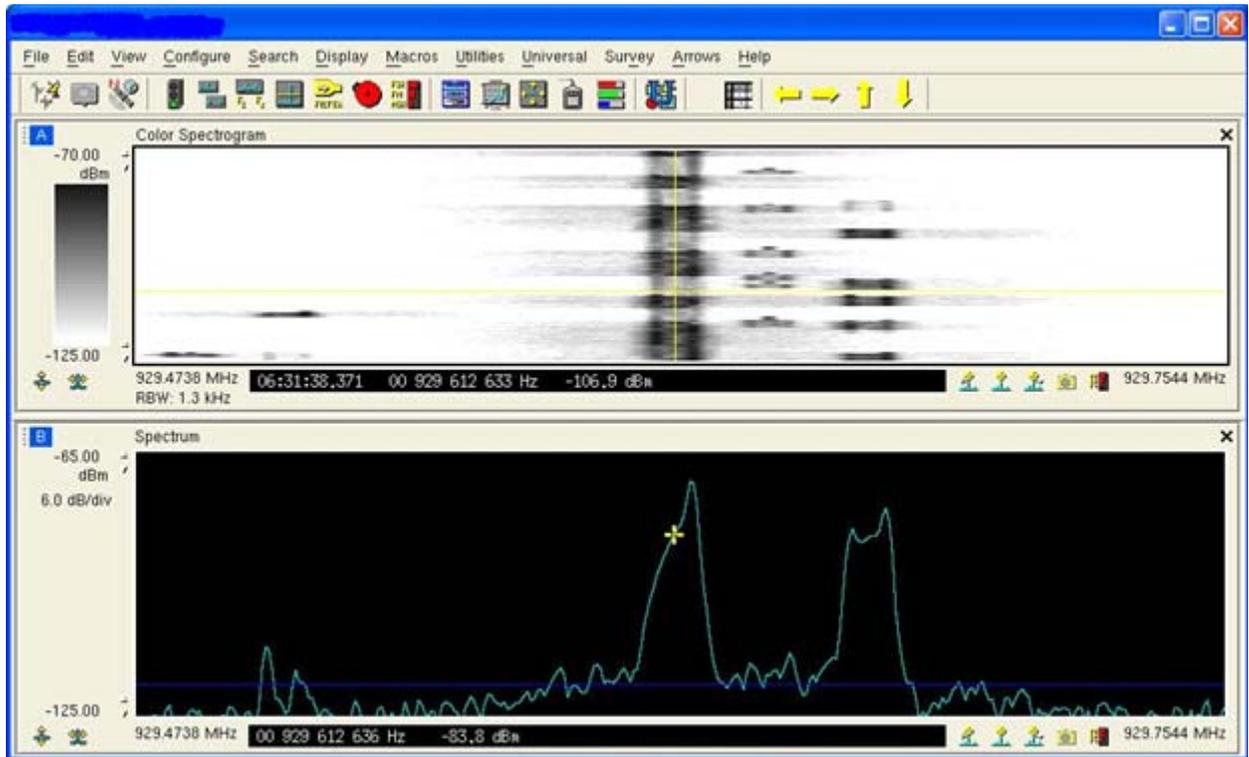
表3

通用数字信号信道带宽示例

| 信号类型                    | 信道带宽   |
|-------------------------|--|
| GSM                     | 200 kHz  |
| CDMA (IS-95)            | 1.25 MHz   |
| CDMA2000                | 1.25 MHz (channel bonding @ 1xEv-DO Rev. B、C)  |
| 3GPP WCDMA              | 5 MHz  |
| 3GPP TD-CDMA            | 5 MHz  |
| 3GPP LTE                | 1.4、3、5、10、15、20 MHz   |
| WIMAX IEEE<br>802.16xxx | 3.5、5、7、8.75、10、20 MHz   |
| TETRA                   | 25 kHz、50 kHz、100 kHz、150 kHz  |
| WLAN & WIFI             | 22 MHz (IEEE 802.11b)<br>20 MHz (IEEE 802.11a,g)<br>20 MHz、40 MHz (IEEE 802.11n)<br>20 MHz、40 MHz、80 MHz (IEEE 802.11ac) |
| DECT                    | 1.728 MHz  |
| ZigBee                  | 5 MHz  |
| ATSC                    | 6 MHz  |
| DVB-H                   | 5、6、7、8 MHz  |
| T-DMB                   | 1.536 MHz  |

- 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显示频率、功率和时间特征（见以下的图3和图4）。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。

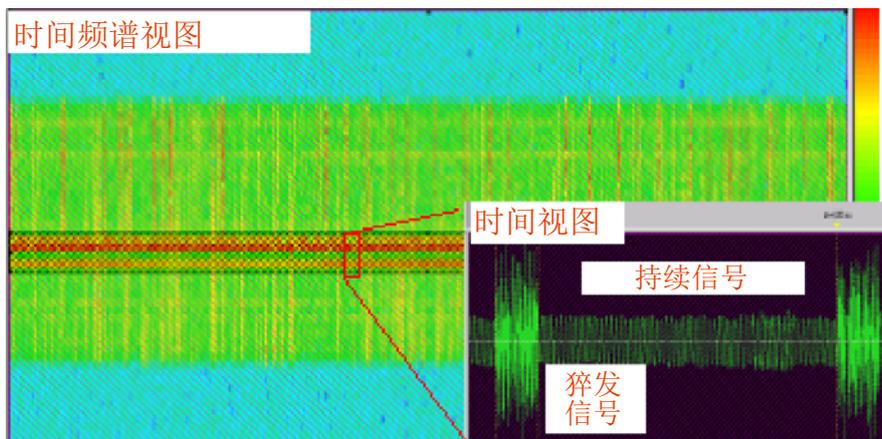
图3  
显示频谱的频谱图示例



SM.1600-03

矢量信号分析软件可用于创建时间和频谱视图，以帮助监管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和噪声行为有所了解。触发电平设置过低可能导致录制带宽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。如果相关信号为触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、带宽、时长和触发机制。

*b.* 利用调整识别软件进行信号分类

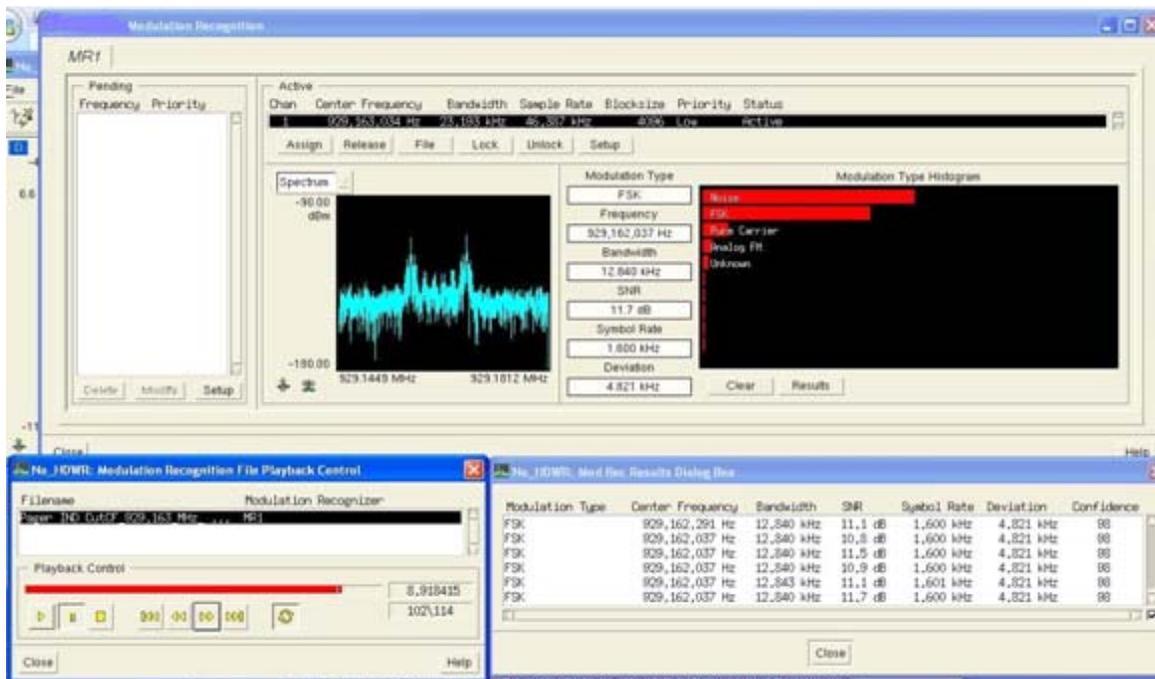
在成功进行I/Q录制后，用户可通过多种软件包“播放”信号，以了解信号的内部参数。不同厂商提供的VSA和监测接收机通过其含有中心频率、录制带宽、抽样速率、日期和时间等信号信息的专有标头录制原始I/Q数据。数据结构通常通过技术手册发布，可用于设置信号识别或调制识别软件。

为成功进行调制分类测量，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；
- 触发监测；
- 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，那么调制识别软件将在文档中对调制类型和符号速率8（八）倍做出评估。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录制在调制识别软件包中播放，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  
调制识别软件示例



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。这在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。

在处理结束时，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，我们目前有足够信心断定，该信号为FSK、具有4.821KHz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。

图6是通过处理评估线性调制（16 QAM）信号的调制参数进行评估的另一示例。这项处理在视图左上角显示了统计动差的频谱和信号的非线性变化，并在视图的右上角显示了频谱功率密度。这类软件对于确定信号内部参数极为有效，而且是走向参数调制的良好开端。

图6

利用信号处理评估调制参数的示例

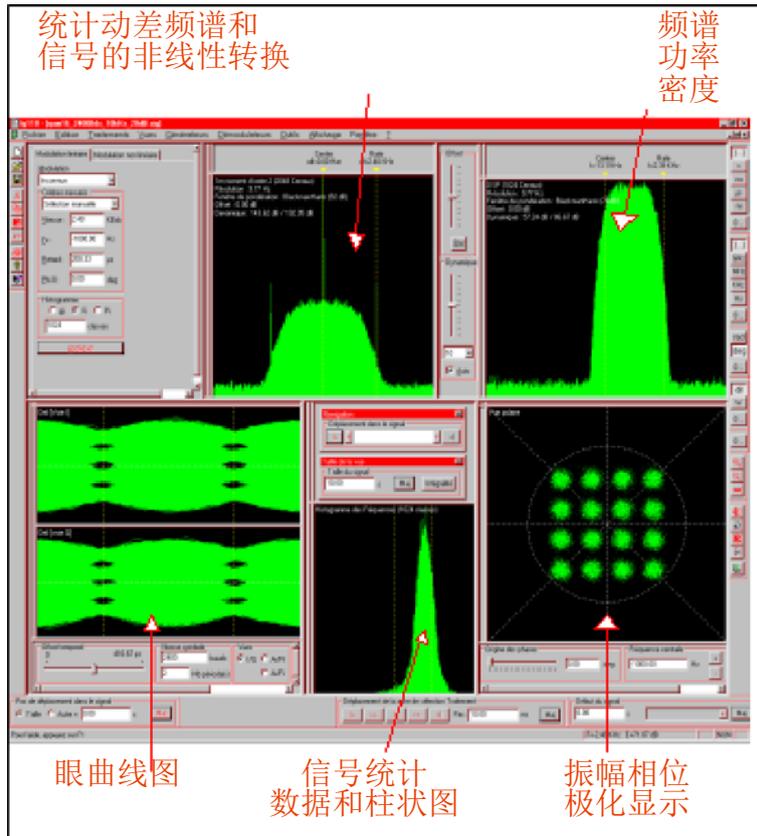


图7说明了可用于测量信号内部参数的PMR、GSM和UMTS等数字单载波信号的统计估计值。

图7  
评估调制参数的统计估计值的使用

| 目的   | 功率和宽带<br>测量    | 中心频率<br>评估                    | 符号率<br>评估                     |                               | 符号评估<br>和解调                            |                 |
|--|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|-----------------|
| 统计<br>估计值  | 频谱<br>功率<br>密度 | 频谱<br>第1矩<br>2阶<br>$E( x ^2)$ | 频谱                            |                               | 眼图<br>和<br>柱状图<br><br>$I/Q$ 振幅<br>相位频率 | 眼图<br>和<br>极坐标图 |
| 信号<br>实例   |                |                               | 频谱<br>第2矩<br>2阶<br>$E( x ^2)$ | 频谱<br>第2矩<br>4阶<br>$E( x ^4)$ |  |                 |
| FSK2<br>Ind. 1<br>SNR 20 dB<br>"类似PMR"                 |                |                               |                               |                               |  |                 |
| GMSK<br>Ind. 0.5<br>SNR 20 dB<br>"类似PMR"               |                |                               |                               |                               |  |                 |
| O-QPSK<br>滚降 0.25<br>SNR 20 dB<br>"类似CDMA<br>2 000 UL" |                |                               |                               |                               |  |                 |
| QPSK<br>滚降 0.25<br>SNR 20 dB<br>"类似UMT S"              |                |                               |                               |                               |  |                 |

SM.1600-07

表4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4  
手工提取信号外部参数的方法

| 测试参数                         | 分析工具   | 调制类型   | 无线电环境类型               |
|------------------------------|--|--|-----------------------|
| M调制 –<br>非同步或同步调制速率<br>(符号率) | 瞬时振幅频谱, $A_i$                                      | PSK (过滤或无过滤)<br>无过滤CPM或经严格过滤<br>QAM (过滤或无过滤)       | 中高SNR                 |
|                              | 瞬时频率频谱, $F_i$ 提高至幂 $N$ ( $N = 2$ (2FSK), 4 (4FSK)) | FSK (无过滤)  | 唯一理想类型: 高SNR。<br>无多路径 |
|                              | 瞬时频率 $F_i$ 的零交叉频谱                                  | FSK (过滤或无过滤)<br>PSK、QAM、MSK                        | 唯一理想类型: 高SNR。<br>无多路径 |
|                              | 在频率的严格过滤后, 信号模块频谱提高至幂 $N$ ( $=2$ or 4 or ...)      | PSK、QAM (过滤或无过滤)<br>FSK (过滤或无过滤)                   | 确认的SNR                |
|                              | 信号频谱提高至幂 $N$ ( $N = 1/h$ )                         | CPM (过滤或无过滤)                                       | 确认的SNR                |
|                              | 信号频谱提高至幂 $N$                                       | $\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK、<br>SQPSK             | 确认的SNR                |
|                              | 自动相关和周期性自动相关                                       | OFDM、SC-FDMA、SC-FDE                                | 全部                    |
|                              | 频谱相关性研究  | PSK、QAM、ASK、SQPSK、<br>$\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK | 全部                    |
|                              | 哈尔小波变换频谱   | FSK  | 全部, 尤其是复杂多路径信道        |

表4 (完)

| 测试参数        | 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<br>复杂多路径信道 |
|             | 频谱提高至 $N$ 幂 ( $N=2$ 、SQPSK和 $\pi/2$ DBPSK; $N=4$ 、 $\pi/4$ DQPSK) | SQPSK、 $\pi/2$ DBPSK、 $\pi/4$ DQPSK, | 确认的SNR           |
|             | 高分辨率频谱功率密度  | OFDM、COFDM、多路复用                      | 中高SNR            |
|             | 瞬时频率 $F_i$ 的柱状图   | FSK                                  | 中高SNR            |
| 需测量的参数      | 分析工具  | 调制类型                                 | 无线电环境类型          |
| 子载波或音的数量    | 频谱功率密度  | 所有调制                                 | 中高SNR            |
|             | 瞬时频率柱状图 $F_i$   | FSK                                  | 中高SNR            |
| 符号同步        | 眼图I/Q、 $A_i F_i \Phi_i$ 矢量图                                       | PSK&QAM过滤或无过滤                        | 中高SNR            |
|             | 眼图 $A_i F_i \Phi_i$ 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, $\Phi_i$                                   | CPM过滤或无过滤                            | 中高SNR            |
|             | 周期自动相关性   | OFDM、SC-FDMA、SC-FDE                  | 全部               |
|             | 已知信号的互相关性   | TDMA、CDMA<br>多个OFDM和SC-FDMA以及SC-FDE  | 全部               |

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。

### 3 利用信号分析软件增进了解

头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的匹配，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。这些调制和解码算法不会将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。

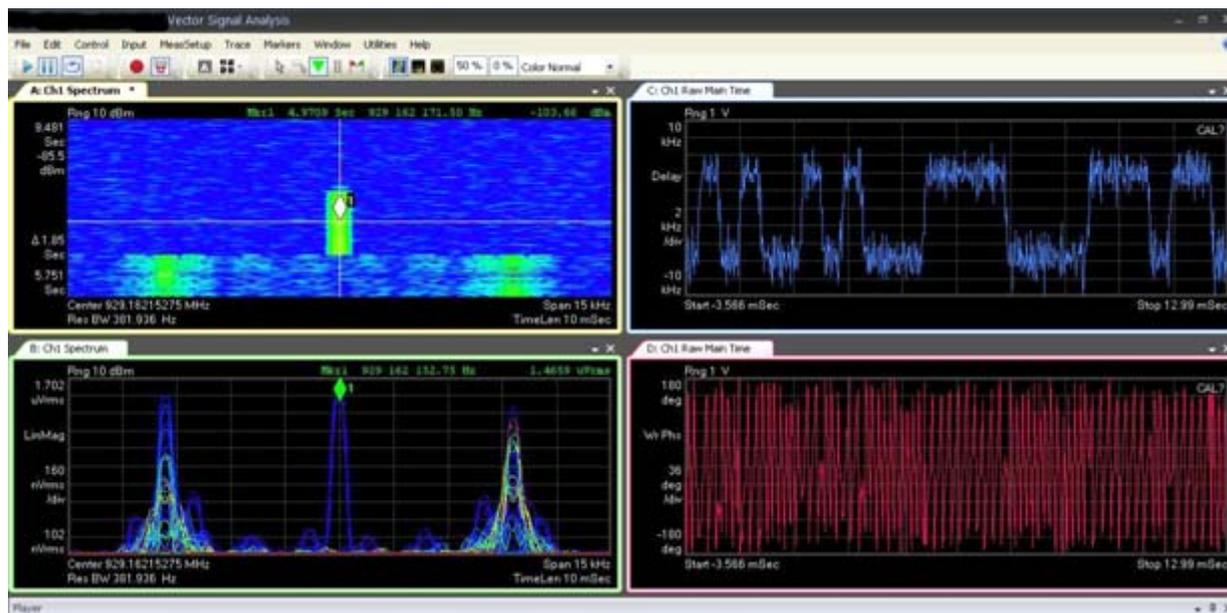
在需要对具体传输加以确认时，将需要信号解码软件包或互相关、自相关或交叉相关技术。已上市销售的商用解码程序包适用于部分但非全部现代通信格式。

#### 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8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，其中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长特征。右上角显示了群组时延或频率与时间的对比。由于这是平移键控信号，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8

VSA软件 – 信号分析窗口选编



SM.1600-08

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 103.7dBm。因此，右上角的描记线（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录制解调以确认识别和发现

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9中，左上部的描计线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率，这一I/Q描计线应极其平稳，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。

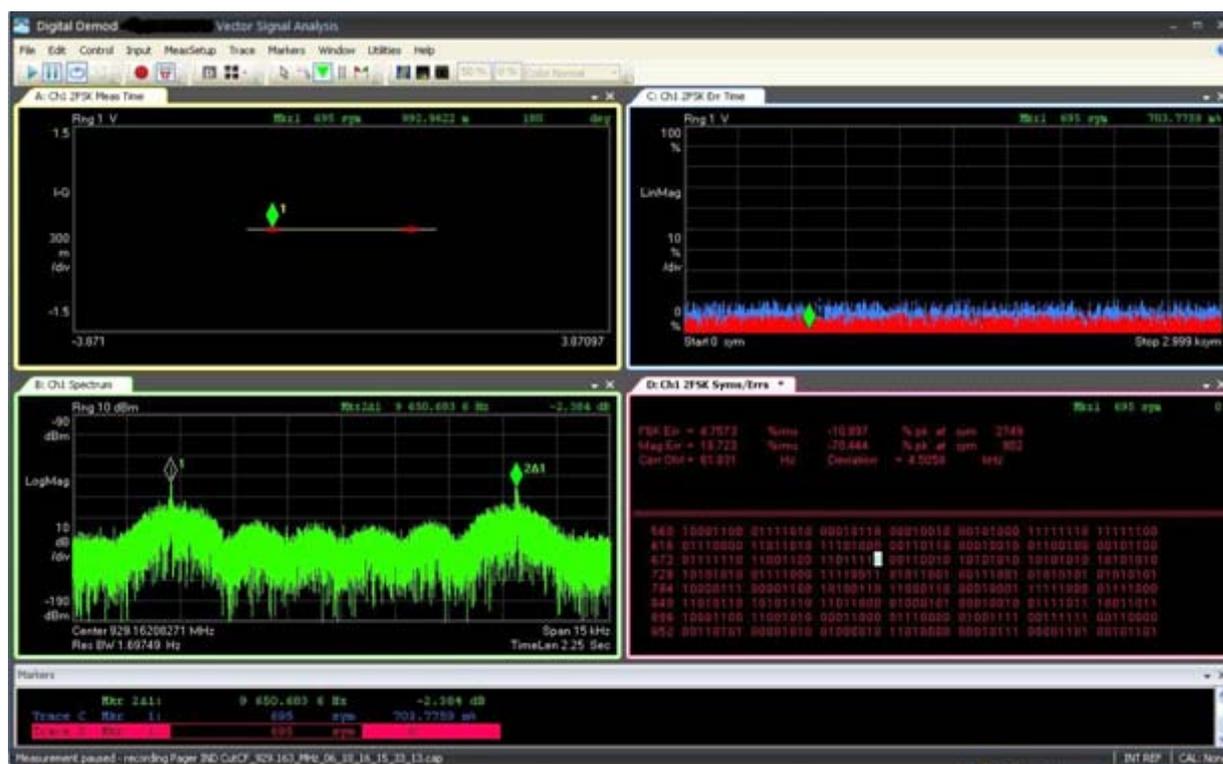
左下部的描计线为多个解调信号综合的信号频谱图，在此情况下解调的符号达3000个。这一频谱显示应与最初看到的信号极相匹配。

右上部的描计线显示了调制符号的误差矢量幅度（EVM）。EVM是理想参考状态“0”或“1”与利用数字解调设置获得的实际解调状态之间的幅度差。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。

右下方的描记图总结性显示了实际的解调比特和差错。请注意，4个描记图的标识都显示与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。

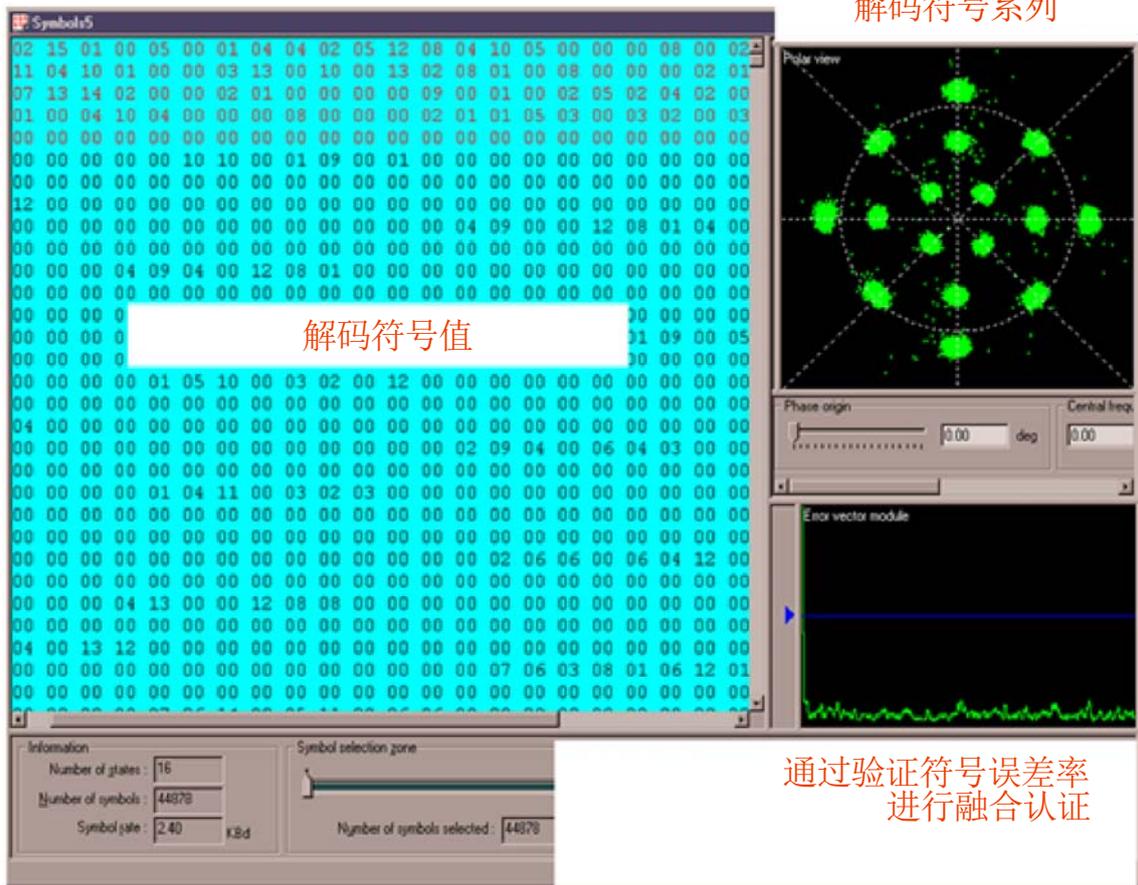
图9

VSA软件 – 数字解调工具



为完整起见，图10显示了利用同类技术和专用于线性调制类型的不同分析程序包得出的更高阶信号（16QAM V29）的识别：

图10  
解调16QAM V29信号示例



SM.1600-10

#### 4 I/Q录制内容的处理

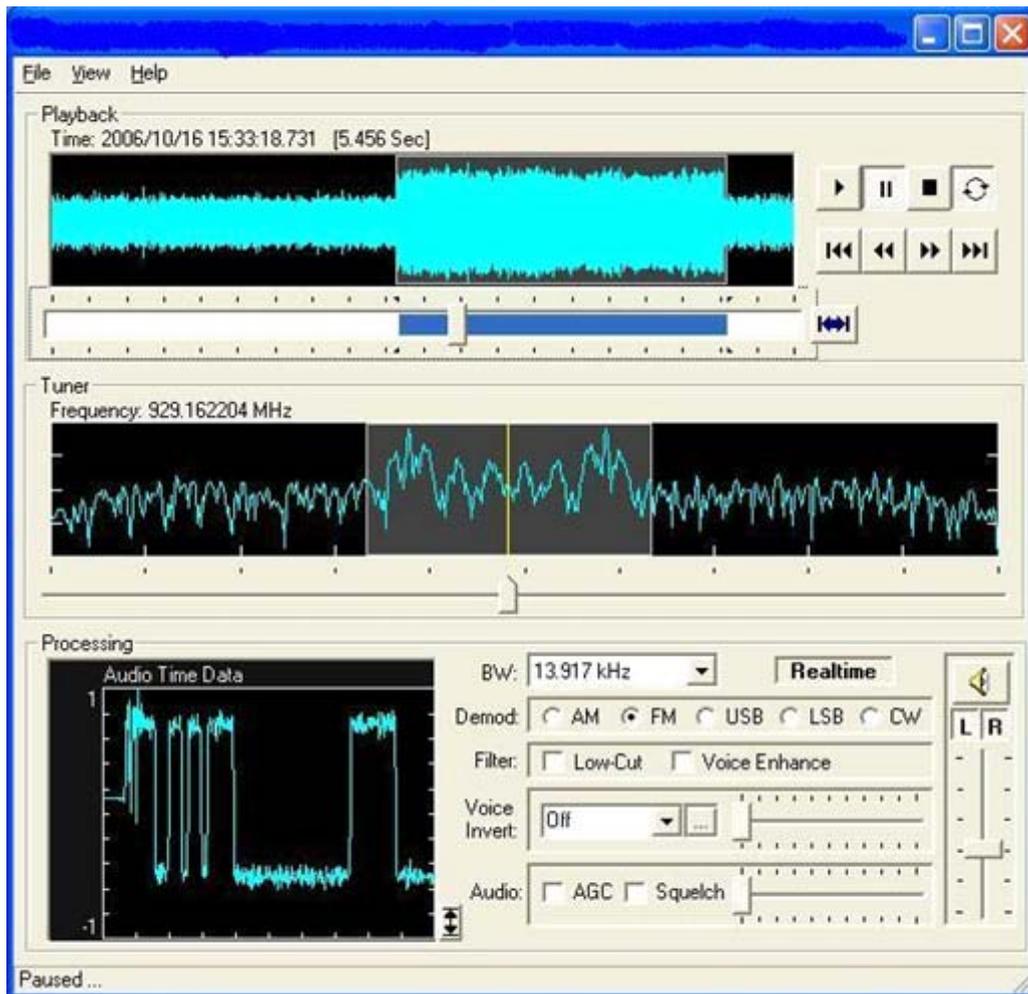
对未知数字信号的技术识别的最后一步是进行I/Q录制内容的解码，以部分或全部地提取原始内容。这一步骤应根据有关信息使用的法律和伦理限制规定进行。以我们为例，可利用商用解码软件处理同样的I/Q录制内容，以便有把握地确认发射源。

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。由于过去未“检测到”录制内容，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视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



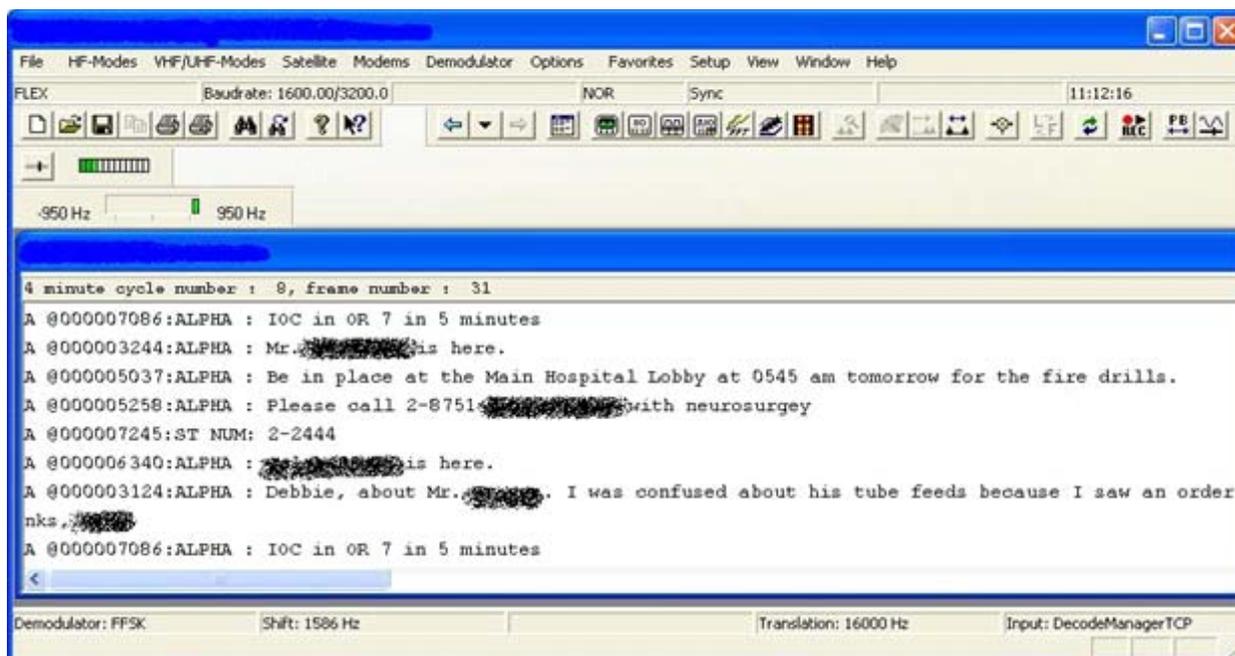
SM.1600-11

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（12.5 kHz）– 或信号外部参数和调制格式（FSK）及符号率（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。

## 5 相关性和其它先进方法

本节旨在描述监管机构可为数字信号识别采用的先进算法。对通用方法的描述和对具体示例的重点审议见附件2。

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。

**自动相关性：**自动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等系列数值的信号处理。

采用这些算法可以发现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）搜寻时长信号。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：评估多普勒频率差错和时间同步瞬间。

步骤2：纠正多普勒频率差错并优化检测和源间隔。

#### *b* 其它先进方法

**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识别。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<sup>3</sup>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]）。

---

<sup>3</sup> 在人工智能领域，混淆矩阵是能够使算法性能可视化，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差错矩阵。

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，可用于信号的发现和识别。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) 循环自动相关功能（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]）

## 6 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。

近年来，在信号分析仪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。

### 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、custom 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；
- 其它：APCO 25、APCO-25 P2（HCPM）；APCO-25 P2（HDQPSK）、DECT、TETRA、VDL mode 3、MIL-STD 188-181C：CPM（选项21）。

## 参考文件

- [1] PRAKASAM P和MADHESWARAN M, 利用小波变换和统计数据参数的数字调制识别模型, 计算机系统、网络和通信杂志2008年卷(2008年),  
文章ID 175236, 8 pagesdoi:10.1155/2008/175236
- [2] HAO Hu, JUNDE Song, 根据认知无线电的频谱相关性分析和SVM进行的信号分类, 北京邮电大学电子工程系第22届国际先进信息网络和应用大会, 以及Yujing Wang, Xidian大学电信工程系

## 附件2

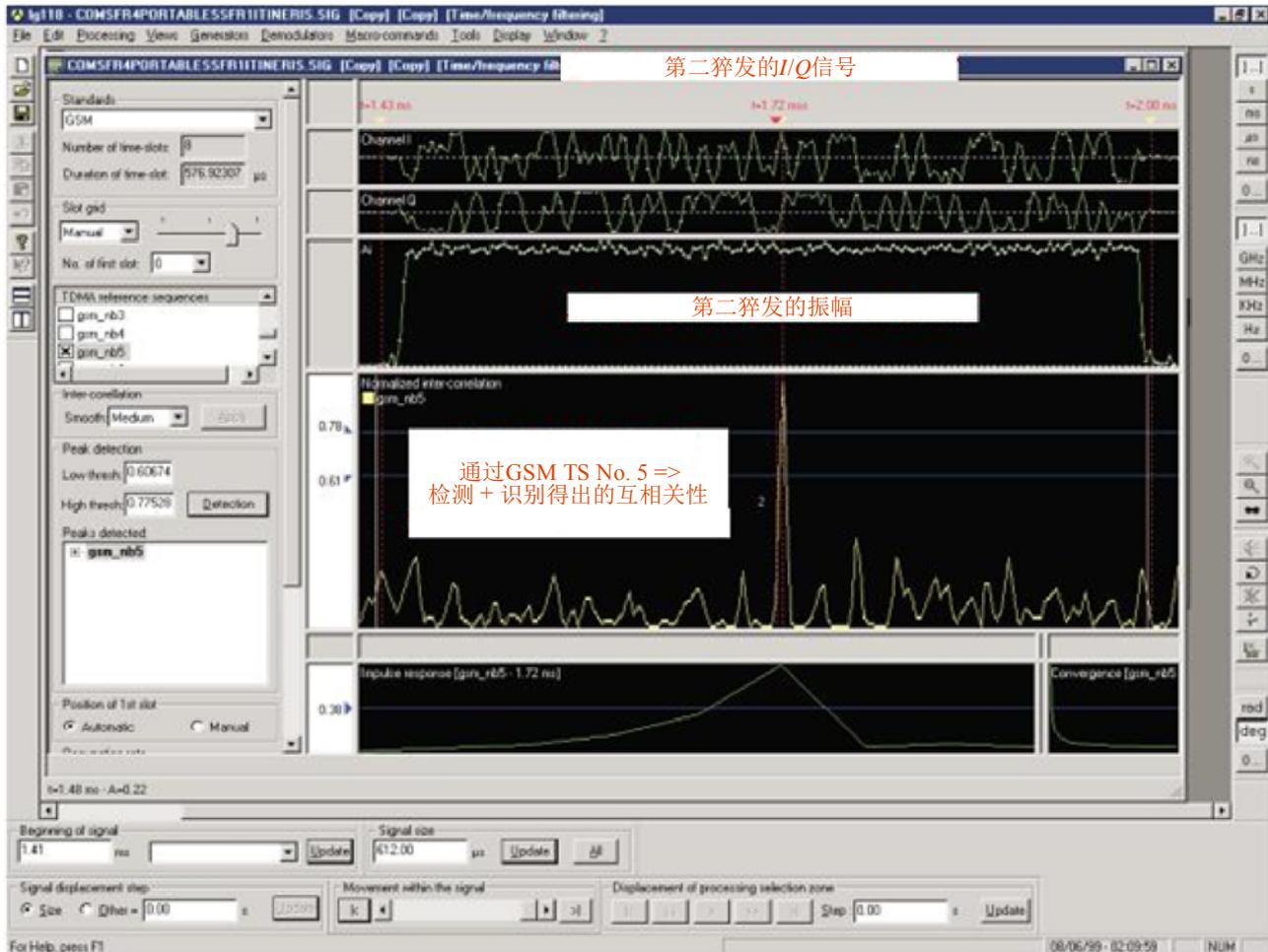
此附件举例说明了具体的复杂数字信号, 并概要介绍了识别措施。

### *a* GSM信号(TDMA)识别的实例

以下显示提供了GSM猝发相关性实例。在此实例中, 将I/Q录制与GSM信号的已知要素(mid-amble)相比较, 从底部算起的第二个窗口显示了相关性结果。

图13

信号识别互相关性技术示例



SM.1600-13

### b OFDM、SC-FDMA和SC-FDE信号调制方式实例

循环自相关性对于分析OFDM、OFDMA、SC-FDE和CDMA信号等部分已知信号具有多种优势，有助于确定波形的周期和循环特征。循环自相关性处理应用是对存在于OFDM等符号中的保护时间等传输信号重复序列的识别，例如，对OFDM、(O)FDMA和SC-FDE调制信号的准确检测和识别过程。

为确定调制速率和信号同步化，可利用复制符号的开始和结尾形成保护时间。因此，为了在OFDM信号中利用信号复制，基本的数学功能是此前采用的自动相关和循环自动相关功能。

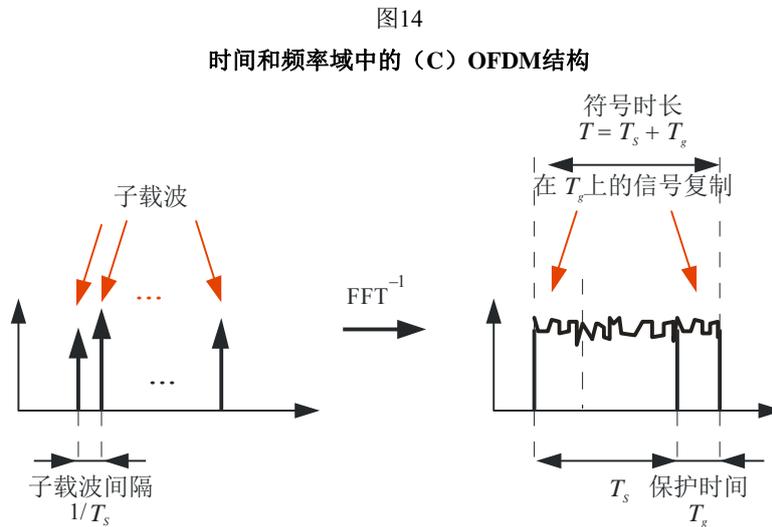
OFDM识别的实际实施可分为三个阶段进行：

第1阶段：利用极细腻频谱显示（频率分辨率高于 $1/(2 \cdot TS)$ ）进行的子载波技术。建议：

- 利用可辨频谱分辨率（和作为结果的整合时间）进行的全面表述，

- 利用大量点和通过适用插值技术进行的FFT计算，
- 通过光标增加聚焦和测量功能。

第2阶段：对信号进行的自动相关性计算旨在揭示相当于延迟 $\tau = T_S$  峰值，以确定子载波 $1/T_S$  之间的间隔（见图14左侧）。应当看到，相当于信道回应的系列峰值因为其数值不应与提供子载波符号时长的峰值相混淆。



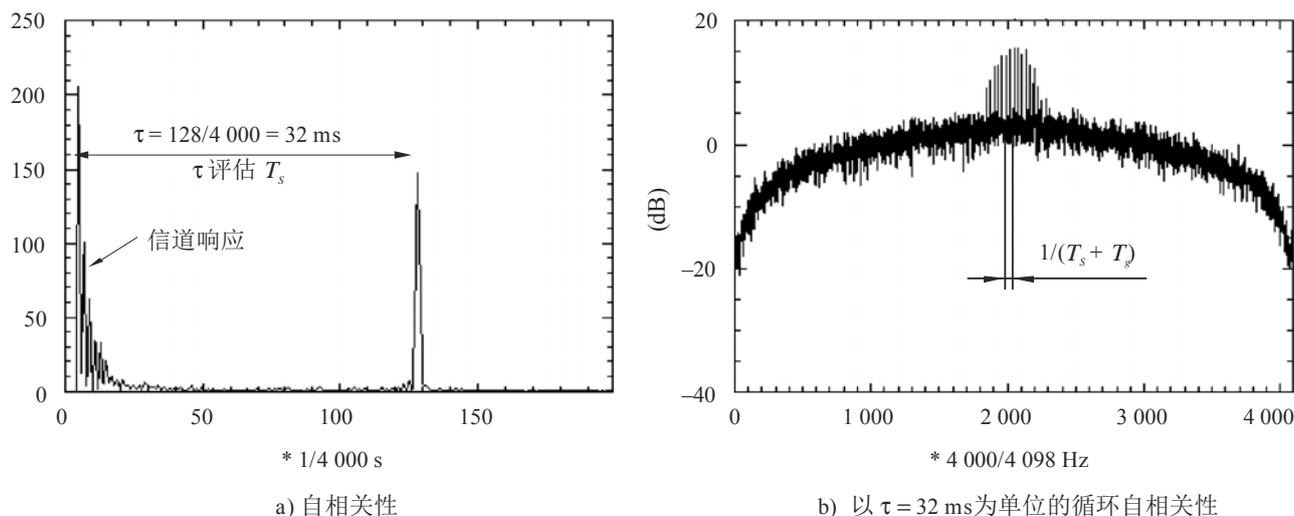
SM.1600-14

第3阶段：对自相关性给出延迟 $\tau$  ( $\tau$ 评估 $T_S$ ) 的循环自相关性计算，以提取相当于构成保护时间的部分信号复制的相关信号部分（见图14右侧）：

- 另外确认符号时长值 $T_S$ （为值 $\tau$ 而非 $T_S$ 计算的循环自相关性并未显示特征峰值）；
- 确定子载波 $1/(T_S + T_g)$  和保护时间 $T_g$ 的调制时间。

图15

用于 (C) OFDM信号的相关性和循环自相关性方法



SM.1600-15

### c WCDMA信号识别方法实例

WCDMA信号分析的实际操作可分三个阶段：

#### 第1阶段：符号率评估

作为实例，3GPP/WCDMA信号的符号率为3.84 MHz，并可通过频谱自相关性计算进行评估。这种标准化的符号率可与通过信号处理得出的评估值相比较。在面对3GPP/WCDMA网络时，这种方法能够将频谱自相关性计算的符号率搜索域局限在接近3.84 MHz的数值，从而减少了计算工作。图16 a)显示了符号率的评估结果。

#### 第2阶段：小区搜索：小区搜索通常通过以下三个步骤进行。

- 步骤1：时隙同步：这通常通过与所有小区通用的同步信道（SCH）主要同步码相匹配的单一过滤器进行。小区的时隙可通过在匹配的过滤器输出中检测到的峰值得出。
- 步骤2：帧同步和码组同步：这是通过接收信号和所有可能的SCH次要同步码之间建立相关性并确定最大数值完成的。由于序列的循环转换独特，码组以及帧同步已得到确定。
- 步骤3：扰码识别：利用帧计时和在第二步骤中发现码组号码，在通用导频信道（CPICH）和所有码组内部的8个不同序列之间建立相关性。具有最大相关性的码被视为小区的导频码号。

可参照3代合作关系项目技术规范（3GPP TS）25.214进行详细的小区搜索说明。

第3阶段：进行有关WCDMA调制的测量。

对接收信号进行反扰频以获得CPICH符号：CPICH符号是通过已从第2阶段帧边缘开始的导频码系列乘以接收信号并对256个抽样进行归纳获得的。

对QPSK调制的确认：在用反扰频信号与主公共控制物理信道（CCPCH）码相乘并进行了频移补偿后，可对主CCPCH信号的调制类型进行检查。可根据上述CPICH符号评估频移。

图16 b)和c)显示的QPSK调制星群和小区搜索结果，是由分别共用通用载波（发现和测量了9个基站（BS））的实地WCDMA(3GPP/UMTS)信号的以往建议分析提供的。

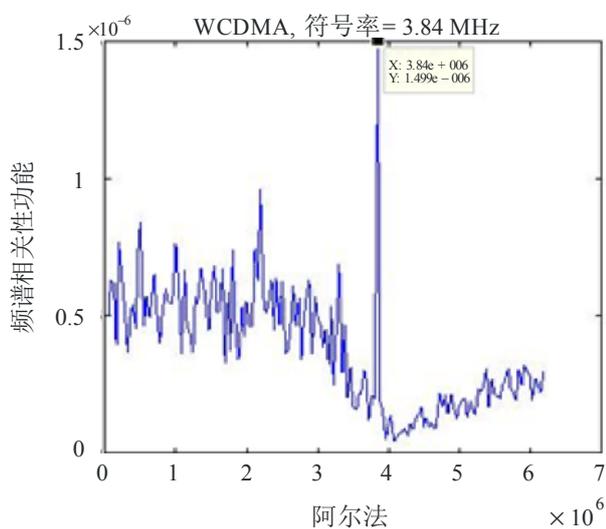
图16

三个阶段3GPP/WCDMA信号的全识别过程说明

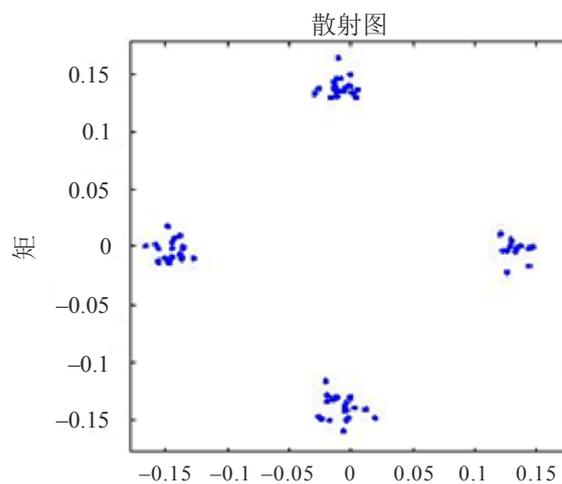
16-a) 符号率的恢复

16-b) 时隙同步、CPICH反扰频和CCPCH解调

16-c) 将a)和b)阶段用于搜索共用同一载波的WCDMA小区



a) 符号率评估



b) 主-CCPCH 信号星群

图16c

在时隙同步、CPICH解扰和CCPCH的解调后检测和  
认定多个共享同一载波的WCDMA小区

