



# GNSS空间信号质量分析方法研究

卢晓春<sup>①②\*</sup>, 周鸿伟<sup>③</sup>

① 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

② 中国科学院精密导航定位与定时重点实验室, 西安 710600;

③ 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

\* E-mail: luxc@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-04-09

中国科学院方向性项目(编号: KJCX2-YW-T12)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815502)资助项目

**摘要** 导航信号质量的优劣, 直接关系到卫星导航系统的性能, 同时也反映了卫星有效载荷的工作状态和各种电性能指标. 中国科学院国家授时中心的 GNSS 空间信号质量评估系统, 以标准仪器监测、离线数据分析和监测接收机三种方式对导航信号质量进行分析与评估. 本文主要介绍了该系统的离线数据分析方式和数据采集方法, 分析了信号功率谱、眼图、星座图和码片赋形等性能, 分析了相关峰、相关损耗等相关性能参数. 分析结果表明, 该系统中使用的信号质量评估方法实用有效.

**关键词** 信号质量评估, 功率谱, 眼图, 星座图, 相关峰

**PACS:** 84.40.Ua, 89.70.+c, 87.16.Xa, 43.60.Gk, 07.05.Kf

经过 20 多年的发展, 全球卫星定位系统不仅使用在军事领域, 也广泛地应用在民用领域. 它以精确、实时、不受地域限制等特点, 成为在陆地交通、航海和航空中通用的导航工具. 目前已建和在建的卫星导航系统包括: 全球系统 GPS, Galileo, GLONASS 和 COMPASS, 区域系统 IRNSS 和 QZSS. 卫星导航系统需要较高的安全性和完好性, 尤其是卫星下行信号的完好性是用户端工作的基础. 因此, GNSS 信号质量监测评估工作, 引起了世界范围内的重视, 其相应的研究已全面展开.

1993 年 10 月美国 GPS-SV19 卫星发生信号异常, 造成 3 m~8 m 的伪距误差<sup>[1]</sup>, 自 1997 年开始, 斯坦福大学研究机构(SRI)加入美国 GPS 联合计划, 负责监测 GPS 卫星 L 波段信号, 主要目的是保证系统所有

卫星连续可靠的工作, 保障用户工作的安全性、完备性<sup>[2]</sup>. 斯坦福大学的研究人员利用 47 m 大口径天线系统和 3 m 天线系统, 长期监测 GPS 的信号功率、码延时、频率及卫星星座合理性, 并进行了数据采集和性能评估工作. 欧洲 GALILEO 已经完成了 Giove-A 和 Giove-B 发射和卫星在轨测试任务. GALILEO 的空间信号测试任务主要由欧洲空间技术研究中心(ESTEC)的导航实验室完成, 并在多个地方组建了地面观测站, 如: 英国奇尔波顿天文台(Chilboiton)、德国宇航研究院(DLR)、欧洲空间局(ESA)等. 奇尔波顿天文台利用 25 m 天线系统完成信号功率测量与验证、信号调制特性、信号带外杂散监测、利用实验测试接收机完成信号跟踪和导航信息评估. 德国宇航研究院(DLR)利用 30 m 天线完成信号采集和数据离

线分析工作<sup>[3,4]</sup>.

中国科学院国家授时中心(NTSC)于2009年4月建立了一套GNSS空间信号质量监测与评估系统. 该系统包括7.3 m天线、射频系统、标准仪器系统、数据采集系统、接收机和离线数据分析系统. 系统可以接收L波段信号, 仪器系统既可实现对导航信号的地面接收功率(带内功率)、频率(频谱、带宽等)等实时监测, 也可对典型通信信号参数如功率谱密度、眼图、星座图、信号调制参数等进行实时监测. 利用接收机实现接收机观测参数的监测. 系统同时具备高速数据采集系统, 实现了数据采集并实时存储和离线分析. 离线分析主要包括接收机观测数据的离线分析和采集信号的离线数据分析. 离线分析系统是整个系统的数据处理核心, 它在实现上述仪器所有监测功能的同时也可以实现信号波形分析、码片形状、相关峰、相关损耗等深层次分析. 该系统不仅实现了COMPASS信号的监测与分析, 同时, 我们成功地采集和分析了GPS的MEO卫星信号和Galileo的Glove-B的信号.

本文主要介绍GNSS信号的监测与评估系统的离线分析功能. 首先简要介绍了GNSS信号的监测与评估系统, 并对文中应用的分析方法作了简单说明, 然后详细地介绍了数据离线分析软件功能, 最后用

图表的形式展示了GNSS信号的分析结果.

## 1 系统组成

GNSS空间信号质量评估系统由射频接收分系统、原子频标分系统、数据管理分系统、射频信号评估分系统、基带信号评估分系统、监测接收机分系统6个部分组成, 如图1.

系统中完成信号评估功能主要由以下3个分系统完成.

(1) 射频信号评估分系统. 射频信号评估分系统的主要功能是: 接收射频分系统送来的导航信号, 经过矩阵开关放大和滤波后, 在外部原子频标的支持下, 利用标准仪器对射频信号的质量进行评估.

射频信号评估主要仪器有矩阵开关、矢量信号分析仪 Agilent89600、实时频谱分析仪 TektronixRSA-6114、功率计 Agilent-N1912A.

(2) 基带信号评估分系统. 基带信号评估分系统的主要功能是: 对射频分系统送来的导航信号进行下变频, 利用信号采集设备, 在外部原子频标的支持下, 对输入信号进行中频带通采样, 将采集结果送入数据流盘, 采用软件分析的方法, 对基带信号的质量进行离线评估.

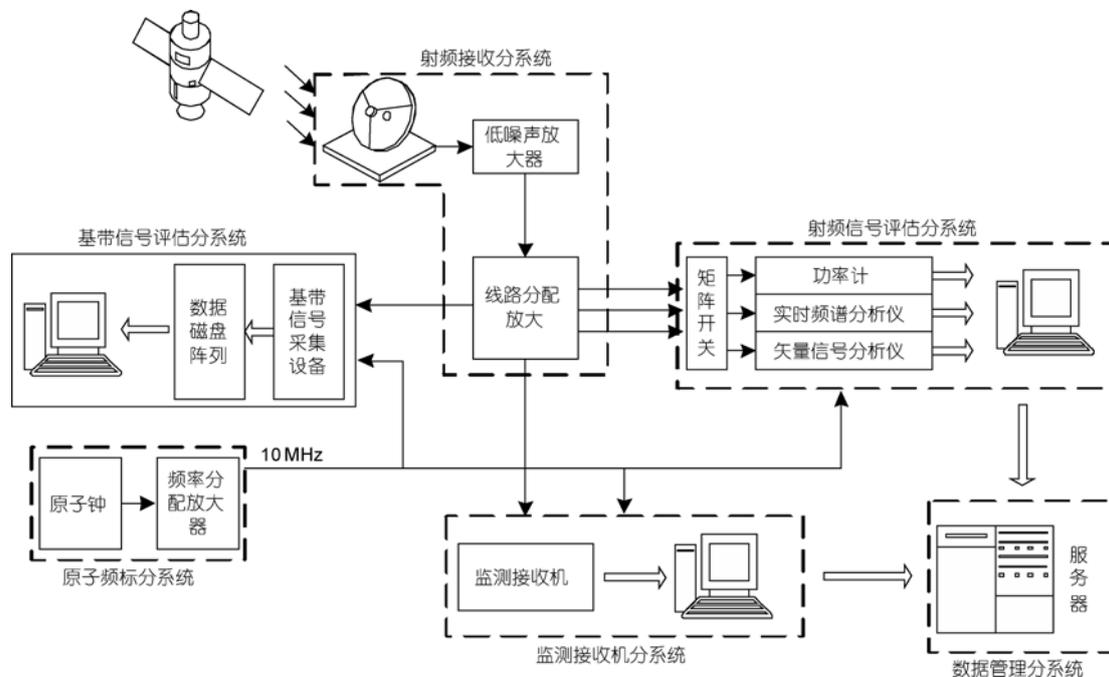


图1 空间信号质量评估系统组成图

(3) 监测接收机分系统. 监测接收机分系统的主要功能是: 接收射频分系统送来的导航信号, 利用监测接收机, 在外部原子频标的支持下, 对输入信号进行相关接收; 将测量结果送入数据管理分系统, 利用分析软件, 对接收机的观测量进行评估.

## 2 数据采集方法

高精度的数据采集设备是离线数据分析的基础. 卫星下行信号经过天线和射频通道完成了放大和滤波, 采集模块的下变频器把 L 波段射频信号频率变为中频 187.5 MHz, 并实现了 150 M 的实时采样和存储. 图中所有设备连接 10 MHz 原子频标, 确保系统内部时钟同步, 信号流程见图 2. 数据采集设备指标如下:

### (1) 数据采集设备性能指标

采样率: 150 MS/s;

带宽: 50 MHz(3 dB)实时带宽;

AD 精度: 16-bit.

### (2) 10MHz 原子频标指标

频率准确度:  $1 \times 10^{-12}$ ;

频率秒级稳定度:  $1 \times 10^{-12}$ ;

相位噪声:

1 Hz 时, 115 dBc/Hz;

10 Hz 时, 125 dBc/Hz;

100 Hz 时, 135 dBc/Hz;

1 kHz 时, 150 dBc/Hz;

10 kHz 时, 155 dBc/Hz.

## 3 信号分析方法

### 3.1 功率谱分析

采用 Welch 修正周期图法对 GNSS 空间信号进

行谱分析. Welch 周期图法是利用改进的平均周期图法估计随机信号的功率谱, 它采用信号分段重叠、加窗、FFT 等技术来计算功率谱. Welch 法可以改善估计谱曲线的光滑性, 大大提高谱估计的分辨率. 对信号的实测功率谱与理想功率谱进行比较, 可以检验信号的功率谱特性. 其中理想信号功率谱包络可利用 BPSK 功率谱公式计算:

$$G_{\text{BPSK}}(f_c) = f_c \frac{\sin^2\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{(\pi f)^2}, \quad (1)$$

式中  $f_c$  是信号码片速率.

在实际应用中, Welch 法的参数及窗函数的选取需要在分析带宽、频率分辨率、偏差和方差等性能上综合考虑.

### 3.2 码片边缘分析

观察指定码片形状和基带信号的边沿特性, 可以分析通道和干扰对信号的影响. 中频信号经过载波和多普勒剥离后, 可以得到基带信号. 数据采样率为 150 M, 经分析发现采样点数不足以描述时域波形的细节, 我们采用数据内插的方式, 把每个码片扩展为 200 个点, 即 C/A 码采样率为 411 M, P 码采样率为 2143 M(曲线放大倍数较大). 为排除噪声的影响, 我们对同一码片形状(0010 或 1101)的片断进行相干累加, 绘制平均后的码片图, 分析图中码片的共性和差异性.

### 3.3 眼图

眼图是指利用实验的方法估计和改善传输系统性能时在示波器上观察到的一种图形. 我们在数据分析过程中使用眼图观察码间串扰和噪声的影响.

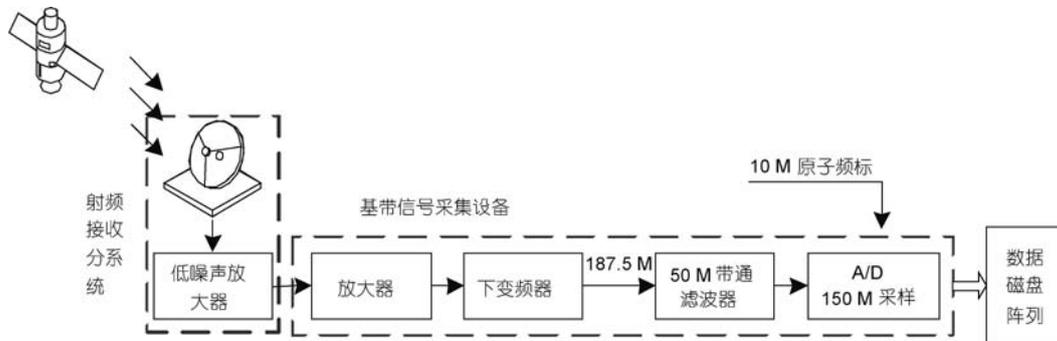


图 2 数据采集流程

采集的原始数据经过滤波、解调、多普勒频移去除等处理. 以初始相位为起始点, 在时域波形图中重复画出多个码片数据.

### 3.4 星座图

星座图被用来分析信号调制域特性, 并计算信号正交调制参数. 星座图是将数字信号在复平面内表示, 直观表示出信号以及信号之间相互关系的图示. 星座图需去除多普勒影响. 数字信号之所以能够用复平面上的点表示, 是因为数字信号本身有复数的表达形式. 虽然信号一般都需要调制到较高频率的载波上来传输, 但最终的检测依然是在基带上进行的, 所以已经调制的带通数字信号  $s(t)$  可以用其等效低通形式  $s_1(t)$  表示, 一般的, 等效低通信号是复数:

$$S_1 = x(t) + jy(t). \tag{2}$$

带通信号  $s(t)$  可以通过将  $s_1(t)$  乘上载波再取实部得到:

$$S(t) = \text{Re}[S_1(t) \cdot \exp(j2\pi f_c t)] \\ = x(t) \cdot \cos(2\pi f_c t) - jy(t) \sin(2\pi f_c t). \tag{3}$$

因此  $s(t)$  的实部可以看作是对余弦信号的幅度调制, 其虚部可以看作是对正弦信号的幅度调制.  $\sin(2\pi f_c t)$  与  $\cos(2\pi f_c t)$  正交, 因此  $x(t)$  和  $y(t)$  是  $s(t)$  上相互正交的分量.

### 3.5 相关峰曲线与相关损耗

相关函数是衡量导航性能的一个重要的指标. 对接收的数字信号进行多普勒去除, 得到基带信号分量, 计算其与本地理想码序列参考信号的归一化互相关, 如下式:

$$\text{CCF}(\varepsilon) = \frac{\int_0^{T_p} S_{\text{BB-PreProc}}(t) \cdot S_{\text{Ref}}^*(t - \varepsilon) dt}{\left( \int_0^{T_p} |S_{\text{BB-PreProc}}(t)|^2 dt \right) \cdot \left( \int_0^{T_p} |S_{\text{Ref}}(t)|^2 dt \right)}, \tag{4}$$

式中,  $S_{\text{BB-PreProc}}$  表示处理后的基带信号; 参考信号  $S_{\text{Ref}}$  表示本地接收机产生的理想基带复制码信号; 积分时间  $T_p$  通常对应参考信号的主码周期.

相关损耗是与导航性能有关的非常重要的参数. 相关损耗指的是在相关处理中有效信号功率相对于所接收信号的全部可用功率的损耗:

$$P_{\text{CCF}} [\text{dB}] = \max_{\text{over all } \varepsilon} (20 \cdot \log_{10} (|\text{CCF}(\varepsilon)|)), \tag{5}$$

$$\text{CL}_{\text{Distortion}} [\text{dB}] = P_{\text{CCF}}^{\text{Ideal-input}} [\text{dB}] - P_{\text{CCF}}^{\text{Real-input}} [\text{dB}].$$

主要有两个原因引起相关损耗: (1) 同一载频上复用了多个信号分量; (2) 由于信道限带和失真所致.

## 4 信号分析结果

### 4.1 信号功率谱包络分析结果

图 3 中的红色曲线是由公式(1)计算产生. 对实际采集的信号, 利用 Welch 周期图法估计信号的功率谱, 并利用包络函数计算信号的功率谱包络, 如图 3 中的蓝色曲线.

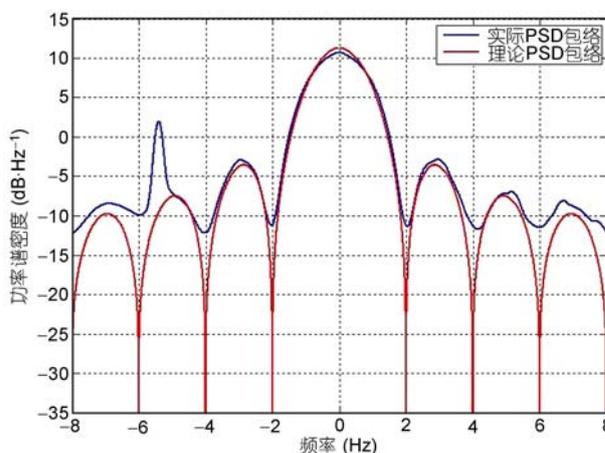


图 3 采集信号功率谱包络与理想信号功率谱包络对比

### 4.2 码片边缘分析结果

我们分析采集数据码片波形, 图 4 中共 4 条曲线 IP/IN/QP/QN, 其中 I 和 Q 分别表示波形来自 I 支路或 Q 支路, P 和 N 分别表示统计的码片断为 0010 或 1101(实际上存在倒 II 的可能), 为了比较 P 和 N 曲线的形状, 绘图时将 N 线取负. 图中每码片内插为 200 点, 每条曲线的时间长度为 2.75 个码片.

### 4.3 眼图分析结果

由于在采样之前要用滤波器对时域接收信号进行滤波, 所以在每一个“眼睛”张开时都会有一个跳变沿. 在图 5 的 3D 效果图中, 跳变沿比较明显. 图 6 中高亮度区域代表经过该区域的数据点较多.

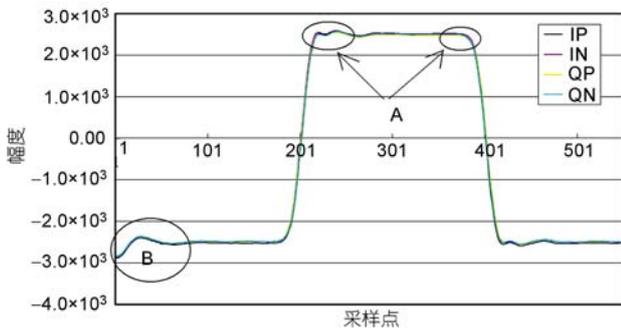


图 4 码片波形分析图

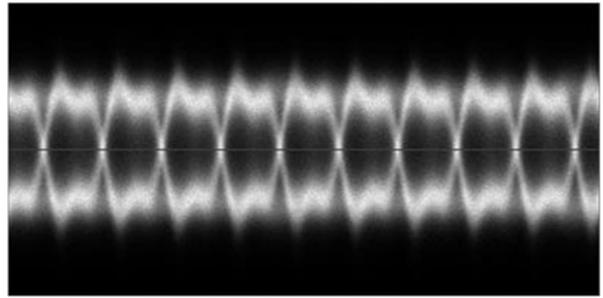


图 6 数据眼云图

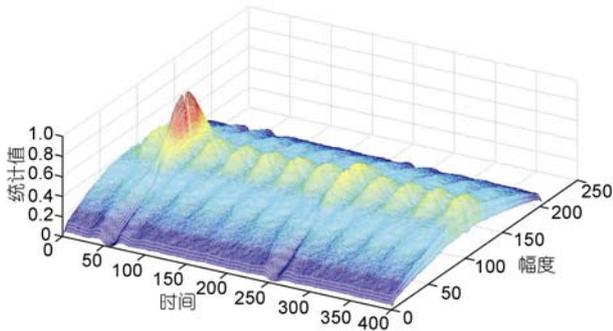


图 5 数据眼云图 3D 效果图

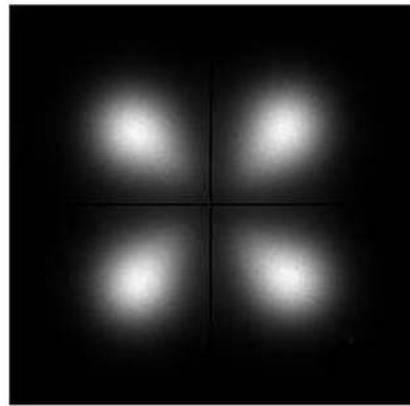


图 7 实测信号星座图

#### 4.4 星座图分析结果

解调后 I/Q 支路数据, 作为复平面的实部和虚部, 逐点描出数据画出星座图, 图 7 展示了 QPSK 信号的星座图, 高亮度区域代表经过该区域的数据点较多. 根据解调后的数据以统计方式得出信号的正交角度差, 幅度调制误差等等.

本次统计得出: 相位误差 0.67°, 信噪比 8.53 dB, 多普勒频移 8.7 Hz, 正交分量幅度偏差约为 2.9526%.

#### 4.5 相关峰曲线与相关损耗分析结果

利用公式(4)和(5)计算得出最大相关值为 0.9689, 相关损耗: -0.2741 dB. 相关曲线和相关峰曲线如图 8

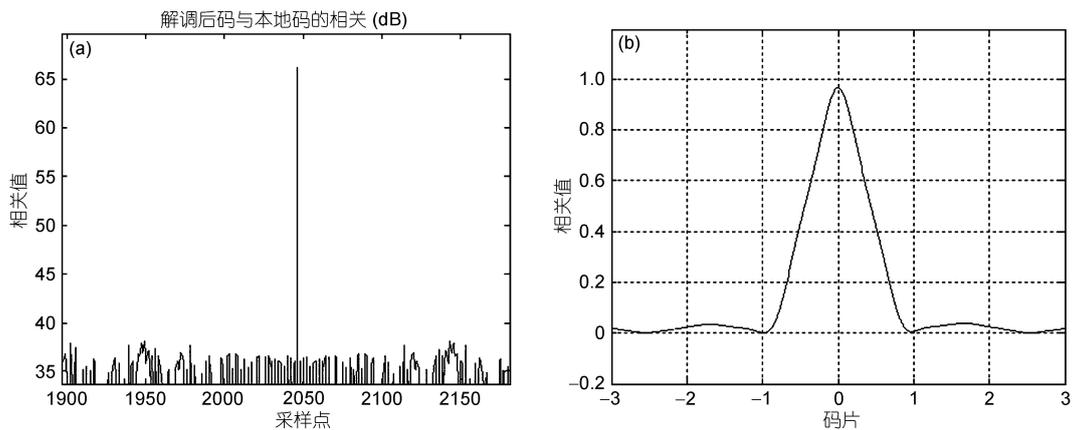


图 8 相关曲线及相关峰曲线

(a) 相关曲线数; (b) 相关峰放大曲线图

所示.

## 5 结论

本文重点讨论了GNSS信号质量评估方法. 基于GNSS信号的特性和大口径天线系统采集的高信噪比GNSS信号, 利用功率谱、眼图、星座图、相关峰

等基本信号分析方法, 分析GNSS信号的调制误差和相关损耗等参数, 并观察通道和噪声对信号性能的影响, 并列举了部分计算结果和分析曲线. 我们专门编写的一整套数据处理和信号分析软件, 系统运行期间证明分析算法行之有效, 软件运行稳定、高效、实时性好.

**致谢** 感谢中国科学院自动化研究所葛健博士的帮助, 感谢中国科学院国家授时中心王雪博士的工作.

## 参考文献

- 1 Phelts R E, Akos D M, Enge P. Robust signal quality monitoring and detection of evil waveforms. In: Proceedings of the Institute of Navigation ION GPS. Salt Lake City: UT, 2000. 1180—1190
- 2 Christie J R I, Bentley P B. GPS signal quality monitoring system. In: ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division 2004. USA: SunDiego, 2004. 9: 21—24
- 3 Spelat M, Hollreiser M, Crisci M, et al. GIOVE-A signal-in-space test activity at ESTEC. In: Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth, Texas, 2006. 26—29
- 4 Soellner M, Kurzhals C, Hechenblaikner G, et al. GNSS offline signal quality assessment. In: Proceedings of ION GNSS, 21st International Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah, Georgia, 2008, 9: 16—19

# Methods of analysis for GNSS signal quality

LU XiaoChun<sup>1,2\*</sup> & ZHOU HongWei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Precision Navigation and Timing Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

<sup>3</sup> Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology (BITTT), Beijing 100094, China

GNSS signal quality directly impacts to the performance of satellite navigation system, it also reflects the operating state of payload and the indicators of signals. National Time Service Center's GNSS signal quality assessment system was designed to collect essential information on GNSS signals quality. The 7.3 meter dish antenna is used to take L band measurements. Using the toolset, the typical communication related parameters are evaluated, such as PSD, scatter, eye-diagram, code shape, and vector diagram, etc; the navigation related parameters are computed, like correlation peak curve and navigation messages. The parameters derived from the correlation function, like correlation-loss, are analyzed.

**signal quality evaluation, power spectrum, eye-diagram, scatter, correlation peak**

**PACS:** 84.40.Ua, 89.70.+c, 87.16.Xa, 43.60.Gk, 07.05.Kf