

# QV频段大带宽卫星通信关口站射频设备误差向量幅度(EVM)的系统性分析与应用

张连松 曲洪学

北京卫星电信研究所有限公司 北京 100094

**摘要:** 本报告系统性地研究了误差向量幅度 (EVM) 作为评估下一代QV频段大带宽卫星通信系统信号质量的核心指标。随着全球卫星通信向更高频段、更大带宽和更高通量发展,传统的单点性能指标(如误码率BER)已不足以全面刻画和诊断复杂的信号损伤。EVM作为一种综合性指标,能够精确量化实际发射信号与理想信号之间的矢量偏差,全面反映包括非线性失真、相位噪声、I/Q不平衡及线性失真在内的多种损伤对系统性能的累积影响。报告首先阐述了EVM的基本概念、物理意义及其与调制误差比(MER)、信噪比(SNR)等关键指标的内在联系。随后,报告深入分析了QV频段(Q频段:33-50 GHz, V频段:40-75 GHz)所面临的独特技术挑战,如严重的路径损耗、元器件性能限制以及对信号损伤的高度敏感性。在此背景下,报告重点剖析了关口站射频链路中各关键设备——包括基带调制器、上变频器(BUC)和大功率放大器(HPA)——对系统总EVM的贡献。

**关键词:** 误差向量幅度(EVM); QV频段; 卫星通信; 高通量卫星(HTS); 关口站; 射频设备; DVB-S2X; 信号质量; 技术指标体系; 非线性失真

**引言:** 随着全球数据业务需求的爆炸式增长,卫星通信系统正经历着向更高通量、更广覆盖和更低时延的深刻变革。高通量卫星(High Throughput Satellite, HTS)系统通过采用多波束、频率复用以及更高频段(如Ka、Q/V频段)技术,实现了系统容量的指数级提升。其中,QV频段因其拥有数GHz的可用带宽,成为未来实现Tbps级超高通量卫星通信系统的关键频段资源。本报告旨在深入探讨EVM在QV频段大带宽卫星通信关口站射频设备中的应用。报告将系统性地分析EVM的理论基础,剖析影响EVM的关键因素,构建一套适用于QV频段关口站的EVM技术指标体系,并提出相应的测试与验证方案,旨在为该领域的技术研发、工程设计和系统运维提供理论指导和实践参考。

## 1 EVM基本概念与物理意义

### 1.1 EVM的定义与计算

误差向量幅度(EVM)是衡量数字调制信号质量的一个关键指标,它定义为在给定时刻,实际测得的信号矢量与理想参考信号矢量之间的差值(即误差向量)的幅度。通常,EVM以均方根(RMS)值的形式表示,并以理想信号最大幅度或平均功率的百分比形式呈现,也可以用分贝(dB)表示。在I/Q星座图上,每个符号都对应一个理想的坐标点。然而,在实际通信系统中,由于各种损伤的存在,接收到的符号会偏离其理想位置。连接理想星座点与实际测量点的向量即为“误差向量”

(Error Vector)<sup>[1]</sup>。EVM量化的就是这个误差向量的平均幅度,其值越小,代表实际信号越接近理想状态,信号质量越高。

### 1.2 EVM的物理意义与综合性

EVM的突出优势在于其综合性。它不是一个单一损伤的度量,而是系统中多种损伤效应累积的最终体现。一个EVM值包含了以下多种关键损伤信息:

- 非线性失真: 主要由功率放大器(如HPA)在接近饱和区工作时产生,表现为AM-AM(幅度-幅度)和AM-PM(幅度-相位)失真,导致星座点发生压缩和旋转。相位噪声: 由系统中的本振(LO)引入,导致星座点在以原点为中心的圆周上随机抖动。

- 线性失真: 包括频率响应不平坦和群时延变化,通常由滤波器、电缆等无源器件引起,导致符号间干扰(ISI),使星座点弥散。

- I/Q不平衡: 调制器中的I路和Q路存在幅度不平衡、相位正交性误差或直流偏置,导致星座图发生扭曲。

- 带内杂散与噪声: 系统内部产生的杂散信号和热噪声会使星座点随机散布在理想位置周围。

通过分析EVM随时间、频率或功率的变化趋势,以及观察星座图的特定失真模式,工程师可以有效地诊断和定位系统中存在的主要性能瓶颈,这是BER等传统指标无法实现的。

### 1.3 EVM与其他性能指标的关系

EVM与其他关键性能指标（如MER、SNR、BER）密切相关，但各有侧重。

●调制误差比（MER）：MER是理想信号的平均功率与误差信号（噪声和失真）的平均功率之比。它与EVM在数学上直接相关，可以相互换算。MER可以看作是数字调制信号的“信噪比”，而EVM则更直观地从矢量误差角度描述信号质量。

●信噪比（SNR）：SNR通常指加性高斯白噪声（AWGN）信道中的信号与噪声功率比。EVM/MER所衡量的误差包含了噪声和设备引入的各种失真，因此MER总是劣于SNR。在理想线性系统中，MER约等于SNR；但在存在非线性失真的实际系统中，MER/EVM能更准确地反映真实信号质量。

●误码率（BER）：EVM与BER之间存在正相关关系，即较低的EVM通常对应较低的BER。EVM可以被视为预测BER性能的先行指标。在系统设计阶段，通过分配EVM预算，可以间接控制最终的BER性能，从而确保通信链路的可靠性。

## 2 QV频段大带宽卫星通信的技术挑战

将通信系统的工作频率提升至QV频段，虽然带来了丰富的频谱资源，但也引入了一系列严峻的技术挑战，这些挑战直接影响着射频链路的EVM性能。

●毫米波器件性能限制：在QV频段，半导体器件（如GaAs、GaN）的增益、效率和线性度均面临瓶颈。晶体管的寄生电容和电感效应变得极为显著，导致器件建模和电路设计难度大增<sup>[2]</sup>。这使得设计出同时满足高输出功率、高效率和高线性度（低EVM贡献）的大功率放大器（HPA）变得异常困难。

●相位噪声恶化：通信系统中的频率变换（上/下变频）依赖于本振信号。本振的相位噪声会随着倍频次数的增加而累积恶化。从L频段中频到QV频段射频需要经过多级上变频和高倍率的倍频，这将导致最终输出信号的相位噪声显著增加，直接劣化EVM性能。

●非线性效应加剧：为了弥补QV频段巨大的自由空间路径损耗，关口站HPA需要提供极高的输出功率。为了追求更高的功率附加效率（PAE），HPA往往被驱动至接近饱和状态，这会引发严重的非线性失真（AM-AM和AM-PM），成为EVM劣化的最主要来源。

●幅相一致性难以保证：在毫米波频段，电路的物理尺寸与波长相当，微小的制造公差、温度变化或器件差异都可能导致通道间的幅度和相位不一致。对于需要多通道合成或采用有源相控阵天线的系统，这种不一致

性将严重影响系统性能。

●多载波系统复杂性：为了充分利用大带宽，系统通常采用多载波传输方案。多载波信号具有较高的峰均功率比（PAPR），这对HPA的线性度提出了更高的要求。同时，载波间的交调失真（IMD）会形成带内干扰，进一步恶化每个载波的EVM。

这些挑战共同作用，使得在QV频段实现并维持优异的EVM性能成为系统设计的核心难点之一。

## 3 关口站射频设备 EVM 性能分析

关口站的上行射频链路通常由基带调制单元、上变频器（BUC）、大功率放大器（HPA）以及天线等部分组成。系统总的EVM是各部分EVM贡献的矢量和。因此，对每个关键设备进行精确的EVM分析和预算分配至关重要。

### 3.1 基带调制器

基带调制器是信号质量的源头。其EVM主要受以下因素影响：I/Q不平衡（包括幅度、相位和直流偏置误差）、数模转换器（DAC）的非线性、以及基带滤波器的幅度和相位响应不理想。在现代高性能调制器中，通过先进的校准算法，其EVM贡献通常可以控制在较小水平。

### 3.2 上变频器 (BUC)

BUC负责将基带或中频信号转换到QV频段。其对EVM的贡献主要来自两个方面：

1. 本振（LO）的相位噪声：如前所述，经过多级混频和倍频，LO的相位噪声会被放大，成为系统EVM的重要组成部分。

2. 内部放大器和混频器的非线性：BUC内部通常包含多级增益模块和混频器，这些有源器件会引入一定的非线性失真。为了避免恶化后续HPA的输入信号质量，BUC自身必须具备良好的线性度。

### 3.3 大功率放大器 (HPA)

HPA是整个射频链路中对EVM影响最大、也是最关键的单元。其非线性特性是EVM劣化的主要根源。

●HPA类型与特性：QV频段关口站常用的HPA主要包括行波管放大器（TWTA）、速调管放大器（KPA）和固态功率放大器（SSPA）。TWTA和KPA能提供非常高的输出功率，但其非线性特性较为严重，需要较大的功率回退（Output Back-Off, OBO）才能满足线性度要求。SSPA（通常基于GaN技术）具有更好的线性度和可靠性，但单体输出功率受限，实现大功率输出需要复杂的功率合成技术<sup>[3]</sup>。

●功率回退与EVM的权衡：HPA的输出功率、效率和线性度之间存在固有的矛盾。当HPA工作在饱和区附

近时,效率最高,但非线性失真最严重,导致EVM急剧恶化。通过增大功率回退,可以显著改善线性度(降低EVM),但代价是效率大幅下降,导致功耗增加和散热问题。因此,选择合适的OBO是系统优化的关键。

●线性化技术:为了解决上述矛盾,现代HPA系统广泛采用线性化技术,其中数字预失真(Digital Pre-Distortion, DPD)是目前最有效的主流技术。DPD通过在信号进入HPA之前对其进行“预扭曲”,以抵消HPA自身的非线性失真,从而能够在较小的OBO下实现优异的EVM性能,兼顾了效率和线性度。

#### 4 EVM 技术指标体系与要求

为确保QV频段大带宽卫星通信系统的端到端性能,必须建立一套科学、合理的EVM技术指标体系。该体系的构建应遵循“自顶向下”、“目标驱动”、“裕度预留”和“预算分配”的原则。

##### 4.1 系统级EVM总指标

系统级的EVM总指标由通信体制(如DVB-S2X)、调制编码方式(MODCOD)以及所需的链路余量共同决定。高阶调制方式对EVM的要求更为严格。例如,对于采用8PSK调制的QV频段大带宽系统,为保证可靠解调并留有一定余量,系统端到端的EVM指标可能被设定为不劣于15.0%。

##### 4.2 设备级EVM指标分解与预算分配

确定系统总指标后,需要将其分解到射频链路的各个组成部分。EVM的合成遵循矢量和(平方和根)的原则,即:

$$EVM\_Total \approx \sqrt{(EVM\_Modulator^2 + EVM\_BUC^2 + EVM\_HPA^2 + \dots)}$$

基于这一原则,并考虑到各设备的技术成熟度和对系统性能的贡献度,可以进行如下的指标预算分配:

●基带调制器:作为信号源头,应具有最高的信号质量。其EVM指标通常要求最严格,例如  $EVM \leq 3.0\%$ 。

●上变频器(BUC):作为中间环节,其线性度和相位噪声性能对全链路有重要影响。其EVM指标可设定为  $EVM \leq 5.0\%$ 。

●大功率放大器(HPA):作为非线性失真的主要贡献者,其EVM预算通常是最大的。在应用DPD等线性化技术后,其在特定OBO下的EVM指标可设定为  $EVM \leq 12.0\%$ 。

将上述指标进行平方和根计算:  $\sqrt{(3.0^2 + 5.0^2 +$

$12.0^2)} \approx \sqrt{178} \approx 13.34\%$ 。这个结果小于15.0%的系统总指标,所预留的裕度(约1.66%)可用于覆盖天线、波导等其他无源器件的贡献以及一定的测试误差和环境变化影响。这种量化的指标分解方法为设备采购、研制和系统集成提供了明确的技术规范和验收标准。

#### 5 测试层级与方法

EVM测试应贯穿于设备研制和系统集成的全过程,主要分为三个层级:

1. 单机设备级测试:对基带调制器、BUC、HPA等单个设备进行EVM测试,验证其是否满足分配的指标要求。测试时需使用高精度的信号源和矢量信号分析仪(VSA),确保测试仪器自身的EVM贡献远小于被测设备。

2. 子系统级测试:将调制器、BUC和HPA等串联起来,形成射频链子系统,进行级联EVM测试。这可以验证各设备间的匹配性,并评估级联后的累积EVM性能。

3. 端到端系统级测试:在关口站现场,对从调制器输出到天线馈源的整个上行链路进行EVM测试,这是对系统最终性能的全面考核。

#### 结束语

误差向量幅度(EVM)已成为衡量和保障QV频段大带宽卫星通信系统性能不可或缺的核心指标。它以其综合性和直观性,超越了传统性能参数,为应对毫米波频段的复杂信号损伤提供了强有力的分析工具。本报告的研究表明,在QV频段高通量卫星通信系统的设计与实现中,必须采取以EVM为中心的系统工程方法。这包括:首先,深入理解射频链路中各关键设备(尤其是HPA)对EVM的贡献机制;

#### 参考资料

[1] 袁丽,王悦,王权,等. Q/V频段卫星通信发展现状与关键技术分析[J]. 无线电工程, 2021, 51(1):78-86. (Q/V频段传播特性、大带宽射频链路设计与EVM关联分析)

[2] 徐培钧,王晨曦,姜河,等. W频段宽带矢量调制信号误差矢量幅度测量技术研究[J]. 宇航计测技术, 2025, 45(3):41-46. (毫米波宽带EVM测量方法,可迁移至Q/V频段关口站测试)

[3] 李文裕. 低轨道卫星信关站射频分系统的关键技术与创新设计[J]. 信息工程, 2024, 7:003. (关口站射频链路非线性与EVM优化,含数字预失真、自适应滤波等工程方案)