

5G通信系统中互调性能的研究

马玉国

上海鑫众通信技术有限公司 上海 200333

摘要：2019年6月6日，工信部向中国电信、中国移动、中国联通发放5G牌照，中国正式进入5G商用元年。截至2024年底5G基站累计建设425.1万个，实现城市全覆盖、行政村镇通达率超90%的惊人规模。建设过程中，发现互调干扰是制约5G通信系统网络性能的关键因素之一。本文系统分析了互调产物的产生机理与对系统的不良影响，针对5G系统中如基站、直放站、无源器件、天馈系统等关键网元，提出了基于材料选择、生产工艺优化、施工及维护的全链路互调解决方案。

关键词：5G；通信系统；互调；三阶互调；有源设备；无源设备

引言

我国的移动通信事业，通过几代通信人的努力，从1987年1G的首次建设，到2024年建设成全球最大的5G通信系统，至此我国的通信技术、规模，都走到了世界前列。随着5G通信系统大规模的部署，互调干扰成为影响网络可靠性的核心问题之一。据统计，国内5G基站因互调退服率达18%，三阶互调产物在3.5GHz频段可导致信噪比下降3~5dB，吞吐量降低20%。

本文首先分析出5G通信系统中，有互调要求的关键网元有基站PA、直放站类有源设备，以及功分器、合路器、天线等无源设备。其次对互调产生的原理和量化方法进行研究，进一步给出关键网元的互调要求。最后，根据经验和理论，提出了从器件设计、生产、施工、维护等全环节、系统级的互调协同解决方案，为5G网络质量提升提供新方法。

一、5G通信系统互调性能基础理论

1. 5G系统概述

5G，即第五代移动通信技术，是着眼于2020年后移动通信需求的新一代通信系统。它采用“云化、分层、服务化”的总体架构，分为接入网（RAN）、传输网和核心网（CN）这主要三部分，同时借助网络功能虚拟化（NFV）和软件定义网络（SDN），实现通信系统的灵活部署与资源优化，实现满足物联网、人工智能、自动驾驶等新兴领域的高速率、低时延、大连接的严苛应用场景需求。

与4G通信系统相比，5G采用了“全连接”架构，凭借三大核心技术为：增强移动宽带（eMBB）、超可靠

低时延通信（URLLC）和海量机器类通信（mMTC）；实现了高速率、低时延、大连接的网络能力，进而满足了严苛应用场景的需求，有力支撑了多样化垂直行业需求。

2. 互调的定义

互调（Intermodulation），指的是当两个或多个不同频率的大功率信号通过非线性器件（如功率放大器、混频器、无源器件、天线等）时，因器件的非线性特性而在新频率产生一定强度信号的现象。这些新产生信号的频率具有一定的规律性，是原始两个信号频率的整数倍组合（ $mF_1 \pm nF_2$ ，其中m和n为整数）。这些新产生的信号，都具有一定功率能量，当这些信号落到通信频道里时，便会对现有通信系统造成一定的干扰。这个物理现象即为互调干扰，对整个通信系统而言互调是有害的。

通信系统中，对系统影响最为显著的互调产物是三阶互调的定义：信号 F_1 和信号 F_2 会在 $2F_1-F_2$ 、 $2F_2-F_1$ 两个频点处，产生三阶互调的干扰信号。

3. 5G系统中互调的研究

互调产生的基本原理是多个信号在非线性材料或产品上传播时，基于频谱的固有特性而发生的倍频现象。5G通信系统具有多载波工作的特性，并且系统设备所采用的材料、器件，其非线性特性也是客观存在、无法规避的，所以5G系统中互调的客观存在是无法避免的。既然互调干扰是无法从根本上予以消除的，那么工作重点就应该放在从每一级网元、每一个环节入手，竭尽全力降低互调产物的强度。

二、5G通信系统互调性能的影响因素

1. 互调对系统的不良影响

当互调产物若落入通信系统相邻信道或接收频段，

并且达到一定的强度，就会干扰系统，导致信噪比下降、误码率升高，严重时会造成接收机阻塞，降低系统容量，最终有可能引起覆盖盲区或弱信号覆盖的情况。当出现这些不良现象时，系统会通过自我修复，增大发射信号强度时会提高系统的功耗，对系统设备自身带来过热或损坏等潜在问题。

2.5G 系统中关键网元及互调要求

在5G通信系统的各类网元中，互调问题较为关键的网元，主要集中在主要集中在射频前端和无源器件，具体可以分为以下三类：

◆基站中射频单元

5G基站是5G通信网络的核心基础设施，承担无线信号的收发、数据传输及构建网络覆盖的重任，与互调相关的主要部件如下：

功率放大器（PA）：作为有源设备的关键部件，其非线性是产生互调产物的主要根源。例如，选用GaN工艺的PA的三阶互调失真（IMD3）性能要求，行业标准是优于-25dBc。

滤波器、双工器、合路器：这些器件主要用于分离发射与接收信号，在行业内对他们的要求更为苛刻，一般需优于-140dBc。

◆中继系统

5G直放站是5G网络覆盖不可或缺的重要补充设备，主要功能通过对基站信号进行放大和转发，扩大基站信号的覆盖范围，是5G基站覆盖的有效延伸。

直放站、中继器：这类设备自身的互调性能必须满足行业标准，比如4G/5G多模大功率数字光纤直放站的三阶互调产物要求低于-30dBm。

◆分布系统与天馈系统

5G的分布系统与天馈系统（天线与馈线系统）是实现5G网络末端覆盖的重要组成部分，对无线信号的高效收发与传输起着关键作用。

天线馈线：若存在接触不良，或采用的材料为非线性（如铁氧体），都可能产生无源互调，对于此类产品的互调，一般要求低于-107dBc。

连接器、电缆组件：接触部件的氧化或松动会直接导致互调问题，通常对此类器件的指标要求为低于-150dBc

功分器、耦合器、合路器、负载等典型的无源器件：此类器件主要作用是实现通信系统的末端分布，一般分为普通类和高品质类两大类，其中高品质类器件，互调要求一般需优于-145dBc@2*43dBm。

三、5G 通信系统互调性能的测试方法与案例分析

1. 互调的量化方法

互调通过dBm和dBc进行量化表示，dBm用于表示互调产物的绝对功率，dBc则为互调产物与载波的相对强度。

在中国移动5G无源器件技术规范书中，对高品质器件的三阶互调要求为 $\leq -145\text{dBc} (+43\text{dBm} \times 2)$ ，这意味着，当两个功率为20W（+43dBm）的信号输入到器件后，该器件的三阶互调要小于-145dBc。

2. 5G 通信系统互调性能的优化策略

依据上文对三类需要关注互调性能的5G通信系统网元的分析，按照网元工作时是否需要供电，将这些网元分为有源设备和无源设备两类。有源设备包括基站AAU、数字直放站、中继器等；无源设备主要包括各类功分器、耦合器、合路器、POI、天线等。

针对这两类设备，分别从方案设计、工艺改进、施工维护三个维度，对其互调问题进行分析，并给出针对性的解决方案，具体如下：

3. 方案设计

从设备中元器件基材的选型入手，选择高线性度与低PIM材料，优先选择纯净度高、导电性能优良的基材。

有源设备：选用GaN PA替换LDMOS；以QPA2211D为例，GaN PA的OIP3 $\geq 35\text{dBm}$ ，IMD3抑制达-25dBc。

无源设备：采用无氧铜导体，用于降低接触电阻，减少非线性效应。在传输导体的结构设计方面，要避免结构突变，确保导体表面粗糙度和光洁度达标。设备的各类导体表面可采用先镀铜后镀银的工艺，借助银的高导电性能，可有效降低信号在基材表面传输时产生的互调值。

为验证材料升级对互调性能的实际提升效果，我司在某区域的城区5G网络优化项目中进行了对比测试。选取了20个存在高干扰风险的站点，将其原有无源器件（采用铝合金导体）分批更换为采用黄铜镀银工艺的同类型高品质器件。使用互调分析仪在2*43dBm测试条件下进行现场抽检。统计数据显示，更换后器件的三阶互调（PIM3）平均值从-132dBc改善至-148dBc，优化幅度达16dB。在站点更换安装后站点的上行平均误码率（BLER）因此下降了约35%，用户感知速率提升显著。

4. 工艺改进

不管是有源设备还是无源设备，在生产制作过程中，需要遵循以下几点：

首先，作业人员应佩戴手套、指套，并穿着防护服，

作业工具做好相应的防护措施，作业环境要保持清洁，杜绝灰尘、金属颗粒等可能导致互调不良的杂质混入，对设备、器件进行必要的隔离和防护；

其次，涉及到焊接工艺时，必须采用无铅焊接、微波焊接等专业技术，在确保焊接效果的同时，提高设备与器件的互调性能；对有互调要求的关键元器件、半成品及成品，均可采用等离子清洗技术，去除助焊剂残留、灰尘等杂质；

生产完成的产品，对其裸露的接头、部件，采取必要的防护手段，如戴防尘帽、贴防尘膜等，有效防止在运输与使用过程中，设备、器件受到污染，从而导致其互调性能下降。

上述工艺规范在我司的生产线上已全面推行。我们跟踪了实施严格工艺控制前后，同一型号功分器产品批次的PIM3性能一致性。实施前，产品PIM3值分布在-138dBc至-150dBc之间，标准差较大；实施无铅回流焊、等离子清洗及全过程洁净度控制后，该型号产品的PIM3值稳定在-147dBc ± 2dB范围内，产品性能一致性和可靠性得到极大提升。

5. 施工及维护

在施工前及维护替换过程中，针对有源设备和无源设备的选用，都需要依据方案设计的要求，选择高互调性能优良的设备。各类设备与器件不仅有基础的行业标准，各大运营商也制定了各自的企业标准，根据不同的使用场景，一般又分为普通器件和高品质器件。在工程建设与维护阶段，应选用符合各运营商建设需求的高互调性能的高品质器件。

安装过程中，各个环节要严格按操作要求作业。在工程现场制作线缆与接头时，严格遵守作业规范，作业结束后，使用便携式互调测试仪对作业结果的互调性能进行测量，只有测量结果达到设计要求方可使用。各网元互联前，要做好防护和清洁，互联时按规定方式、扭矩作业。安装完成后，按要求进行必要的防尘防水处理。针对沿海、室外、高温等特殊场景，必须选用不低于IP65防护等级的防水型高品质设备和器件。设备、器件完成安装后，还需要进行必要的固定、防撞、防尘防水等处理，以保障器件的使用寿命。

在某高铁隧道的5G覆盖项目中，初期开通后部分路段出现上行干扰导致切换失败率高的问题。通过分段式PIM测试定位，检查后发现干扰源于个别馈线接头因安

装扭矩不足产生微放电。严格按照操作规范重新紧固并复测PIM合格后，该路段上行干扰强度降低15dB以上，切换成功率从91%提升至99.5%。

四、结论与展望

本文系统地阐述了5G系统中互调干扰的机理与影响，并给出提升5G通信系统互调性能的有效措施，通过材料升级，如采用GaN PA替换传统元件，对器件表面进行镀银工艺处理，显著优化了设备与器件的互调性能。在工艺改进方面，引入无铅焊接、微波焊接技术，在制造环节减少互调干扰的产生。结合具体的工程案例分析表明，从设计、生产到施工维护的全链路协同优化，能将关键无源器件的互调性能提升15dB以上，有效解决实际网络中的干扰问题。在施工过程中，严格遵守作业规范，确保工程现场5G系统互调敏感网元的高质量制作与安装，切实提升了系统整体的互调性能。

6G通信系统致力于构建全域立体的通信网络，涵盖地面、高空、太空等多维空间，融合卫星通信、无人机通信等多样化通信模式。这种复杂的通信架构意味着系统内会存在海量不同频率、不同功率等级的信号。不同信号在非线性器件中相互作用，产生的互调产物种类和数量将呈指数级增长，互调干扰的复杂性远超5G时代，对系统的干扰协调与管理构成严峻挑战。因此，通信系统的互调问题将是永恒存在的，是需要持久关注与研究的课题。未来，建议将人工智能与大数据分析引入互调监测与预测，实现从被动排查到主动预防的运维模式转变。

参考文献

- [1] 邓宏贵, 刘刚. 5G通信发展历程及关键技术. 电子工业出版社, 北京: 2020, 9787121388972
- [2] 张守国, 沈保华, 李曙海, 雷志纯, 凌文杰. 5G无线网络优化实践. 清华大学出版社, 北京: 2021, ISBN9787302570196
- [3] OPPO研究院组编, 沈嘉, 杜忠达, 张治等. 5G技术核心与增强: 从R15到R16. 清华大学出版社, 北京: ISBN9787302571513
- [4] 杨峰义, 谢伟良, 张建敏. 5G关键技术与工程建设. 人民邮电出版社, 北京: ISBN9787115504883
- [5] 张世全. 无源互调干扰导论. 西安电子科技大学出版社, 陕西: ISBN: 978-7-5606-3442-5