

浅谈谐波对连续波雷达发射机的影响

西昌卫星发射中心 张 驰 唐德科 郭南 颜启璟 李 阳

摘要：连续波雷达因结构简单、测速精度高、功耗低等优势，广泛应用于多普勒测速、近炸引信、车辆防撞、战场监视等领域，发射机作为其核心组成部分，信号输出质量直接决定雷达系统整体性能。谐波作为射频系统中由非线性特性产生的倍频信号，是连续波雷达发射机不可避免的干扰源，其不仅会造成发射机自身功率损耗、器件老化，还会引发信号失真、邻道干扰等问题，严重降低雷达的探测精度和抗干扰能力。本文从谐波的产生机理出发，分析谐波对连续波雷达发射机性能的多方面影响，并简要探讨谐波抑制的常用技术手段，为连续波雷达发射机的设计、优化和维护提供理论参考。

关键词：连续波雷达；发射机；谐波；非线性特性；谐波抑制

一、引言

谐波的存在会打破连续波雷达发射机的正常工作状态，轻则导致信号失真、功率效率下降，重则引发系统自干扰、周边电磁频谱污染，甚至影响雷达对目标的有效探测。随着雷达技术向高频、高精度、小型化方向发展，发射机的器件集成度不断提高，非线性问题愈发突出，谐波带来的负面影响也更为显著。本文将围绕谐波的产生、对发射机的具体影响及抑制思路展开分析，为相关工程实践提供理论支撑。

二、连续波雷达发射机中谐波的产生机理

谐波的产生本质是射频系统中器件的非线性特性导致信号发生失真，使输出信号中出现基波频率整数倍的新频率分量[2]。理想状态下，射频器件应具备完全的线性特性，仅对基波信号进行放大、转换等操作，不会产生新的频率成分。但实际的连续波雷达发射机中，无论是有源器件还是无源器件，都存在不同程度的非线性，其中有源器件的非线性是谐波产生的主要来源。

连续波雷达发射机中的功率放大器、混频器、振荡器是核心有源器件，其非线性特性是谐波产生的主要诱因。功率放大器作为发射机的关键部件，负责将振荡器产生的弱基波信号放大至足够的发射功率，为了追求更高的功率效率，实际应用中功率放大器往往工作在非线性区，此时输入信号的幅度超过器件的线性动态范围，输出信号会产生严重的失真，进而生成大量谐波信号。当频率为 f 的基波信号进入非线性功率放大器后，输出端除了基波 f 外，还会出现 $2f$ （二次谐波）、 $3f$ （三次谐波）等倍频信号，且谐波的幅度会随谐波次数的增加逐渐降低，但高次谐波仍会对系统造成干扰。

混频器的作用是实现信号的频率转换，其工作原理基于器件的非线性变频特性，在完成基波信号频率转换的同时，不可避免地会产生谐波及互调产物；振荡器的频率稳定度直接影响雷达信号质量，其内部的有源器件非线性会导致输出信号中夹杂谐波分量，成为发射机谐波的初始来源。

三、谐波对连续波雷达发射机的主要影响

谐波作为连续波雷达发射机中的无用信号，其影响贯穿于发射机的信号产生、放大、辐射全过程，不仅会降低发射机自身的工作性能，还会对雷达系统整体及周边电磁环境造成负面影响，主要体现在功率效率降低、器件老化加速、信号失真、频谱污染等方面。

3.1 降低发射机功率效率，造成能量浪费

发射机的核心功能是将电能转化为射频能量并辐射出去，基波信号是实现雷达探测的有效能量，而谐波信号属于无用的能量损耗。发射机中的功率放大器等器件在产生基波信号的同时，需消耗部分能量生成谐波信号，谐波次数越高，能量损耗虽逐渐降低，但整体上仍会导致发射机的有效功率输出占比下降，功率效率降低。例如，当功率放大器的二次谐波抑制比不足时，部分能量会转化为二次谐波，使得基波信号的辐射功率达不到设计要求，为了满足雷达探测的功率需求，需提高放大器的输入功率，这又会进一步加剧器件的非线性，形成恶性循环。

3.2 加速器件老化，降低发射机可靠性与使用寿命

谐波信号的产生会导致发射机内部器件的损耗增加，长期运行下会加速器件老化，降低系统的可靠性和使用寿命。谐波信号还会引发器件的谐振现象，当谐波频率与器件的固有谐振频率重合时，会产生谐振过电压、过电流，对器件造成冲击，严重时直接损坏器件，增加发射机的故障概率[4]。

3.3 导致发射信号失真，降低雷达探测精度

雷达接收机在对回波信号进行处理时，无法有效区分基波回波与谐波回波，会将谐波分量误判为目标信号的一部分，导致对目标速度、距离的测量出现偏差[1]。例如，在多普勒测速雷达中，谐波分量会使接收机检测到的频率差出现误差，造成测速精度下降；在近距离探测雷达中，谐波引发的信号失真会导致目标回波的信噪比降低，使雷达难以识别弱小目标，甚至出现目标漏检的情况[5]。

四、连续波雷达发射机的谐波抑制技术思路

针对谐波对连续波雷达发射机的多重负面影响，谐波抑制成为发射机设计和优化的核心环节，其核心思路为从源头减少谐波产生、在传输过程中抑制谐波、通过后端处理抵消谐波。目前，连续波雷达发射机中常用的谐波抑制技术主要分为源头抑制、传输抑制和后端抵消三类[3]。

4.1 源头抑制：优化器件选型与工作状态，减少谐波产生

源头抑制是最根本的谐波抑制方法，通过选择高线性度的射频器件、优化器件的工作状态，从根本上减少谐波的产生。在器件选型方面，优先选用线性动态范围大、谐波抑制比高的功率放大器、混频器、振荡器，在器件工作状态优化方面，合理设计功率放大器的工作点，使其工作在

接近线性的区域。同时通过合理的电源设计，保证器件供电电压的稳定性，避免因电压波动导致的线性度下降。

4.2 传输抑制：采用滤波技术，滤除传输过程中的谐波

在谐波产生后，通过在发射机的信号传输路径中增加滤波电路，滤除谐波信号，是最常用的谐波抑制手段。根据连续波雷达发射机的工作频段和谐波特性，选择合适的滤波器类型，如低通滤波器、带通滤波器、陷波滤波器等，将谐波信号滤除，仅让基波信号通过。针对连续波雷达的谐波抑制需求，研究人员还开发了专用的谐波抑制滤波器，如宽阻带滤波器、基于缺陷地（DGS）的滤波器、基于缺陷微带（DMS）的滤波器等。

4.3 后端抵消：采用信号处理技术，抵消已产生的谐波

自适应抵消技术通过建立抵消矢量的数学模型，实时检测谐波信号的变化，动态调整抵消信号的幅度和相位，适用于工作环境复杂、谐波分量动态变化的场景；针对调频连续波（FMCW）雷达，可采用中频频率调整技术，通过改变混频器的解斜频率输入，调整目标的基带频率，再通过频谱旋转、组合等算法，实现谐波分量的抑制，该技术可使无杂散动态范围提升 30dB 以上，且适用于任意频段的雷达系统。

五、结论与展望

随着连续波雷达向高频、高精度、小型化、集成化方向发展，发射机的器件密度不断提高，工作频率持续提升，非线性问题将愈发突出，谐波抑制也将面临新的挑战。未来，谐波抑制技术的发展将呈现以下趋势：一是新型宽禁带半导体材料的广泛应用；二是滤波器的小型化、集成化设计，将谐波抑制滤波器与发射机的射频前端、天线等部件进行一体化集成，提升滤波效果的同时，满足雷达小型化的需求；三是智能自适应谐波抑制技术的发展，结合人工智能、数字信号处理等技术，实现对谐波分量的实时检测、动态预测和精准抵消，适应复杂多变的工作环境。总之，谐波抑制是连续波雷达发射机设计和优化随着相关技术的不断发展，对连续波雷达的影响将得到更有效的控制，为连续波雷达在更多领域的应用奠定基础。

参考文献

- [1] 任仕召, 魏光辉, 潘晓东, 等. 典型雷达装备带内连续波辐射效应试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(5): 57-62. DOI:10.11884/HPLPB202032.190471.
- [2] 马可, 李慧敏, 王仁涛, 等. 发射信号泄露的连续波雷达方程[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1295-1299.
- [3] 雷云, 王礼麒, 石秀琨. 单天线连续波雷达发射泄漏噪声全链抑制技术[J]. 电讯技术, 2022, 62(8): 1131-1135. DOI:10.3969/j.issn.1001-893x.2022.08.017.
- [4] 简森林, 何宗锐. 基于步进频连续波雷达的射频抵消[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(2): 189-193.
- [5] 杨昌福. 改善行波管发射机频谱质量的分析[J]. 电讯技术, 2004, 44(4): 155-157.