

数字预失真技术在低轨卫星通信数字相控阵天线中的应用

韩晓梦^{1,2,3}, 王继康^{1,2,3}, 杨再新^{1,2,3}, 李健行^{1,2,3}, 王安阳^{1,2,3}

(1.上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 202161;

2.上海市卫星互联网重点实验室, 上海 202161;

3.卫星互联网全国重点实验室, 上海 202161)

摘要: 低轨卫星通信系统正朝着广覆盖、高性能的方向发展。传统相控阵天线通过功率回退来改善线性指标, 该方法影响相控阵天线系统的等效全向辐射功率 (equivalent isotropically radiated power, EIRP) 指标。因此将数字预失真 (digital pre-distortion, DPD) 技术引入低轨卫星通信系统成为研究趋势, 以解决星载相控阵天线 EIRP 和发射线性度矛盾的问题。基于性能和复杂度最优的一阶 B 样条数字预失真非线性模型进行实测, 测试结果显示, 数字预失真技术可以改善数字相控阵天线系统 EIRP 和线性要求的矛盾。

关键词: 低轨卫星; 功率放大器; 数字预失真; 行为建模

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025031

Application of Digital Predistortion Technique to Digital Phased Array Antenna for the Low Earth Orbit Satellite Communication System

HAN Xiaomeng^{1,2,3}, WANG Jikang^{1,2,3}, YANG Zaixin^{1,2,3}, LI Jianxing^{1,2,3}, WANG Anyang^{1,2,3}

1. Shanghai Satellite Network Research Institute Co., Ltd., Shanghai 202161, China

2. Shanghai Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 202161, China

3. State Key Laboratory of Satellite Network, Shanghai 202161, China

Abstract: Low-orbit satellite communication systems are developing towards wide coverage and high performance. Traditional phased array antennas improve system linearity indicators through power backoff, a method that affects the equivalent isotropic radiated power (EIRP) indicator of phased array antenna systems. Therefore, introducing digital pre-distortion (DPD) technology into low-orbit satellites has become a research trend to address the contradiction between the EIRP of spaceborne phased array antennas and transmission linearity. In this paper, field measurements were carried out based on the first-order B-spline digital pre-distortion nonlinear model with optimal performance and complexity. The test results showed that digital pre-distortion technology can alleviate the contradiction between the EIRP and linearity requirements of digital phased array antenna systems.

Keywords: low earth orbit satellite, power amplifier, digital predistortion, behavioral modeling

0 引言

随着地面通信领域 5G 技术的成熟与应用, 通信技术正在向 5.5G 和 6G 时代演进, 其中低轨卫星通信系统作为

6G 通信网络架构中的关键组成, 正逐步展现出其不可或缺的重要地位。相较于传统地面通信系统, 低轨 (low earth orbit, LEO) 卫星通信系统凭借其广泛的覆盖范围, 能够触及并服务于因地地理条件限制而难以部署地面基站

的偏远区域（如荒漠、广袤海域及茂密森林），有效弥补了地面通信的覆盖盲区。同时，与中高轨卫星通信系统相比，LEO卫星通信系统凭借其更低的成本、更短的传播时延以及更小的传输损耗，展现出显著的性能优势与经济效益优势。全球范围内LEO卫星通信系统的发展不仅推动了卫星制造、卫星发射、先进通信技术及半导体技术等关键领域技术的突破性进展，还为实现低成本、高效率的低轨卫星通信系统奠定了坚实的基础。

卫星通信的概念可追溯至1945年。尽管在20世纪八九十年代，涌现出了众多旨在通过构建大型低轨卫星星座以实现全球互联网接入的项目，但受限于当时的技术成熟度，这些项目最终未能成功落地。直至2014至2016年，随着高阶调制技术、多波束天线技术及数字通信载荷的飞速发展^[1]，低轨卫星通信提供全球宽带服务的概念再次被提上议程，并展现出截然不同的技术革新潜力。

1 相控阵天线的发展方向及主要技术难点

相控阵天线有模拟波束成形相控阵天线、数字波束成形相控阵天线和混合波束成形相控阵天线。目前，星载多波束相控阵天线以模拟波束成形网络来产生波束为主。随着半导体技术的发展，具有高灵活性、高精度和高准确度的数字波束成形架构成为相控阵天线的发展趋势。数字波束成形网络的重量和功耗主要由信号带宽和天线组件的数量决定，与要产生的波束数量无关，因此可以灵活扩展波束数量。数字波束成形网络通过数字资源实现幅相调整功能，比模拟波束成形网络有更高的精度和准确度。数字波束成形芯片Prime^[2]是Satixfy公司在2019年左右提出的世界上第一个可以在卫星通信中商用的数字波束成形芯片。Satixfy计划未来在卫星通信中使用数字相控阵天线技术，已经相继与OneWeb和Telesat达成合作。因此本文基于数字相控阵天线开展数字预失真技术的研究。

相控阵天线作为低轨卫星通信系统实现高质量通信的核心卫星载荷，其性能优化对于构建发展方向为大容量、低成本、低功耗的低轨卫星通信系统具有至关重要的作用。因此，针对低轨卫星通信系统，优化相控阵天线的体积、重量、性能、功耗及成本，成为支撑该系统高效运行的关键技术挑战之一。3GPP提出的非地面网络（non-terrestrial networks, NTN）低轨卫星通信体系基于5G技术框架，其广泛采用正交频分复用（orthogonal frequency division multiplexing, OFDM）信号波形进行数据传输。然而，OFDM信号因其多子载波特性，易

产生高峰均比问题，这对相控阵天线末级功率放大器（以下简称“功放”）提出了更为严苛的要求。研究显示，功放在星载相控阵天线的功耗中占比较为突出，同时功放需在保持高效率的同时具备高线性度。因此，研究功放线性和效率优化技术，成为解决上述难题、保障相控阵天线高性能运行的关键路径之一。在地面通信系统中，数字预失真技术已被广泛证明为提升功放线性度和效率的有效手段。在星载相控阵天线领域，主要通过功率回退来改善系统的线性指标，这样会导致数字相控阵天线系统线性指标要求和有效全向辐射功率（effective isotropic radiated power, EIRP）要求的矛盾。因此，可以考虑将数字预失真技术应用在星载数字相控阵天线领域，以解决数字相控阵天线系统EIRP和线性指标间的矛盾。

2 典型的数字预失真技术

典型的数字预失真系统如图1所示，包括发射模拟通道、反馈模拟通道和数字信号处理模块。发射模拟通道和反馈模拟通道分别完成数模转换、上/下变频、功率放大及信号耦合。数字信号处理模块包括数字预失真器（digital predistorter, DPD）和模型参数估计等模块。

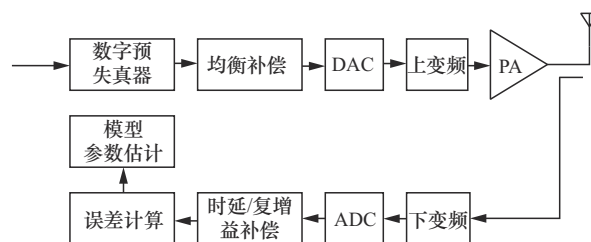


图1 数字预失真系统

功放和预失真器的行为模型种类繁多，但可以概括为四大类：查找表模型、基于Volterra级数及其简化形式的模型、分段及插值模型、神经网络模型。其中，由Volterra级数模型衍生出的简化模型，由于具有结构简单、模型精度高等优点，被广泛应用于学术研究中。分段及插值模型则具有稳定性高的优势，在工业界受到较多的关注。近期，有学者应用混合专家模型^[11]、决策树^[12]等机器学习方法，进一步丰富了分段数字预失真技术的研究。本节详细介绍学术界以及工业界广泛应用的由Volterra级数模型衍生出的简化模型和分段模型。

2.1 Volterra级数的简化模型

Volterra级数是描述非线性系统的常用数学模型^[3]。

Volterra 模型的 p 阶可逆性在 1988 年被 Biglieri 等证明后^[4], 应用于对功放的非线性失真补偿。基于 Volterra 级数的基带等效模型表示为:

$$y_{\text{volterra}}(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{\substack{m_1=0 \\ p\text{-odd}}}^M \sum_{m_2=m_1}^M \cdots \sum_{m_{(p+1)/2}=m_{(p-1)/2}}^M \cdots \sum_{m_{(p+3)/2}=0}^M \cdots \sum_{m_p=m_{p-1}}^M h_{p,m_1,\dots,m_p} \prod_{i=1}^{(p+1)/2} x(n-m_i) \prod_{k=(p+3)/2}^p x^*(n-m_k)$$

其中, M 为模型的记忆深度, P 为模型的非线性阶数, $h_{p,m_1,\dots,m_p}$ 表示第 p 阶 Volterra 核, 即模型系数。2004 年前后, 出现了一大批适用于具有实时性在线系统的简化 Volterra 级数模型。例如, Ding 等^[5]提出了记忆多项式 (memory polynomial, MP) 模型预失真器, 仅保留了“对齐的 (aligned)” 时延项, 在大幅降低模型系数计算复杂度的同时保证了建模精度。

$$y_{\text{MP}}(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h_{pm} x(n-m) |x(n-m)|^{p-1} \text{ 广义记}$$

忆多项式 (generalized memory polynomial, GMP) 模型^[6]是 Morgan 等在 2006 年提出的更适用于宽带通信系统的简化 Volterra 级数模型, 该模型相对 GMP 模型保留了交叉记忆项, 表示为:

$$y_{\text{GMP}}(n) = \sum_{p=1}^{P_1} \sum_{m=0}^M h_{pm}^1 x(n-m) |x(n-m)|^{p-1} + \sum_{p=2}^{P_2} \sum_{m=0}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_1} h_{pml}^2 x(n-m) |x(n-m-l)|^{p-1} + \sum_{p=2}^{P_3} \sum_{m=0}^{M_3} \sum_{l=1}^{L_2} h_{pml}^3 x(n-m) |x(n-m+l)|^{p-1}$$

基于 GMP 模型的预失真器实现结构如图 2 所示, 其中, 每个查找表 (look-up table, LUT) 代表一组选定的 (m, l) 对应的 $\sum_{p=1}^P h_p |x|^{p-1}$ 。

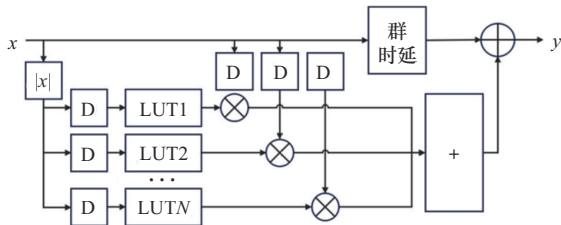


图 2 基于 GMP 模型的预失真器实现结构

2.2 DVR 模型

分解矢量旋转 (decomposed vector rotation, DVR)

模型^[7]从信号幅度和相位两个维度来描述非线性系统的失真特性, 是基于向量选择因子构造的行为级模型。DVR 模型表达式为:

$$y_{\text{DVR}}(n) = \sum_{m=1}^M h_m^0 x(n-m) + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M h_{km}^1 |x(n-m) - \beta_k| \cdot e^{j\theta(n-m)} + \sum_{m=0}^M \sum_{l=0}^L \sum_{i=0}^K h_{kml}^1 |x(n-m) - \beta_k| \cdot e^{j\theta(n-l)} \cdot |x(n-i)|$$

由上述表达式可知, 系数 h_{km} 的求解是线性的。 K 和 M 分别为非线性阶数和记忆深度, $\theta(n)$ 是 $x(n)$ 的相位, β_k 是预先设定好的阈值, 通常为 $k/K, k=1, 2, \dots, K$ 。为了更好地描述功放的非线性特征, DVR 模型中也存在各种不同的交叉项, 包括不同时刻信号幅度间的相关性、不同时刻信号幅度与复信号之间的相关性等。仅保留线性项和一阶基函数项的 DVR 模型项, 也类似一个分段模型。DVR 模型的表达式归纳起来如下式所示。

$$y_{\text{DVR}}(n) = \sum_{m=1}^M h_m^0 x(n-m) + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M h_{km}^1 |x(n-m) - \beta_k| \cdot e^{j\theta(n-m)} + \sum_{m=0}^M \sum_{l=0}^L \sum_{i=0}^K h_{kml}^1 |x(n-m) - \beta_k| \cdot e^{j\theta(n-l)} \cdot |x(n-i)|$$

基于 DVR 模型的数字预失真器的实现结构如图 3 所示, 其中每个 LUT1 代表一组选定的 (m, l) 对应的 $\sum_{k=1}^K h_k |x(n) - \beta_k|$, 每个 LUT2 代表一组选定的 (m, l, i) 对应的 $\sum_{k=1}^K h_k |x(n) - \beta_k|$ 。

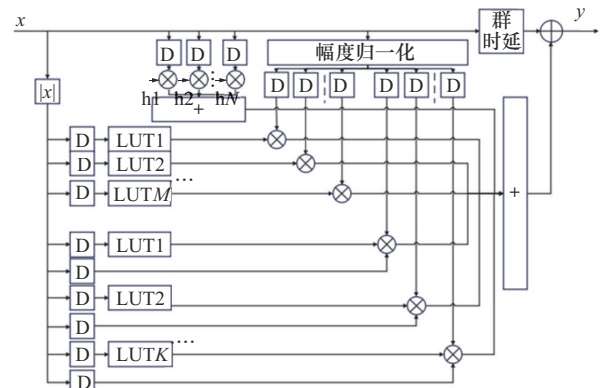


图 3 基于 DVR 模型的数字预失真器的实现结构

2.3 基于一次B样条的分段模型

将GMP模型中的多项式替换为通用的表达式，有：

$$y_{\text{spline}}(n) = \sum_{k=1}^{K_1} \sum_{m=0}^{M_1} h_{km}^1 x(n-m) f_k(|x(n-m)|) + \sum_{k=1}^{K_2} \sum_{m=0}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_1} h_{kml}^2 x(n-m) f_k(|x(n-m-l)|) + \sum_{k=1}^{K_3} \sum_{m=0}^{M_3} \sum_{l=1}^{L_2} h_{kml}^3 x(n-m) f_k(|x(n-m+l)|)$$

其中， $f_k(|x(n)|)$ 代表第 k 段函数。2008年，Safari等^[8]将三次样条基用于数字预失真器的模型。样条(spline)函数是一种特殊的分段函数，其可以使用更低阶次的多项式。如果使用三次样条基或者二次样条基，那么插值的计算复杂度较高。随着通信系统越来越复杂，对工程实现的简化要求越来越强烈，有学者研究使用基于线性插值基的一次样条基拟合功率放大器(power amplifier, PA)的非线性^[9]，一次函数插值只要使用简单的线性插值即可。进一步简化线性插值计算，可以使用一次函数二阶B样条作一次样条基，其表达式为：

$$B_{k,2}(u) = \begin{cases} \frac{u - u_i}{u_{i+1} - u_i}, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ \frac{u_{i+2} - u}{u_{i+2} - u_{i+1}}, & u_{i+1} \leq u \leq u_{i+2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

对应的插值公式为：

$$F(|x|) = \frac{|x| - |x_{k+1}|}{|x_k| - |x_{k+1}|} h_k + \frac{|x| - |x_k|}{|x_{k+1}| - |x_k|} h_{k+1}$$

其中， $|x|$ 为信号幅度， h_k 和 h_{k+1} 分别代表第 k 段和 $k+1$ 段样条的系数。 $\frac{|x| - |x_{k+1}|}{|x_k| - |x_{k+1}|}$ 和 $\frac{|x| - |x_k|}{|x_{k+1}| - |x_k|}$ 称为线性插值基。基于一次B样条的分段模型预失真器的实现结构如图4所示，每个LUT2代表一组选定的 (m, l) 对应的 h ，为了逻辑实现的便利性，可以将每个LUT分成奇偶两个存储表。

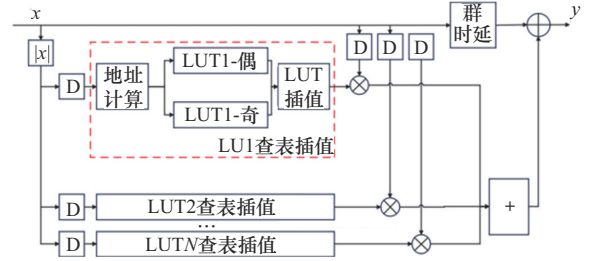


图4 基于一次B样条的分段模型预失真器的实现结构

3 仿真及性能对比

3.1 数字预失真模块在DBF相控阵中的系统架构

数字波束成形(digital beam forming, DBF)架构相控阵天线，是在数字域进行每副天线的幅相调整，数字预失真模块在DBF相控阵天线中的系统架构如图5所示。从数学上看，DBF模块输入的 M 个波束经过一个 $M \times N$ 的复矩阵运算，输出 N 路信号。通常，如果不做特殊设计， N 路信号的每一路都对应一个功率放大器和一副天线。基于该链路架构，数字预失真架构可以使用传统地面通信中的数字预失真训练架构，一个数字预失真模块对应一个功率放大器^[10]。

3.2 PA模型

本文仿真使用的功放为仿真模型，功放的等效基带模型由多项式模型和分段模型组合而成，具体表达式为：

$$y_{\text{PA}}(n) = \sum_{m=-\frac{M_{\text{PA}}-1}{2}}^{\frac{M_{\text{PA}}-1}{2}} \sum_{p=0}^{P-1} c_{p,m} x(n-m) |x(n-m)|^p + \sum_{m_1=-\frac{M_{\text{PA}}-1}{2}}^{\frac{M_{\text{PA}}-1}{2}} \sum_{m_2=-\frac{M_{\text{PA}}-1}{2}}^{\frac{M_{\text{PA}}-1}{2}} \sum_{l=0}^{L-1} d_{k,m_1,m_2} x(n-m_1) f_l(|x(n-m_2)|)$$

其中， $c_{p,m}$ 和 d_{k,m_1,m_2} 用于构造功放的压缩特性，同时避免

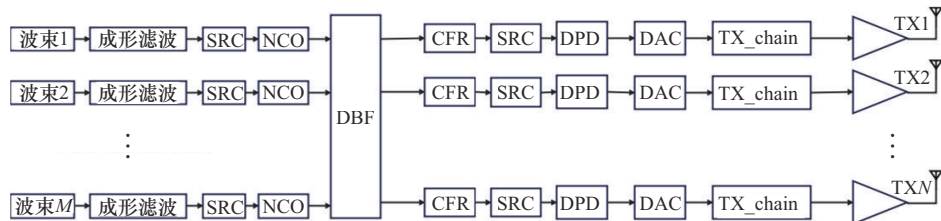


图5 数字预失真模块在DBF相控阵天线中的系统架构

出现功放输出饱和现象。 d_{k,m_1,m_2} 选择随机数即可,但是多项式模型的系数选择若要满足上述要求,其高阶次项对应的系数不能太大,因此 $c_{p,m}$ 与 p 构造了如下关系 $c_{p,m} = -q_1^{-pq_2} q_3$ 。对于简单功放模型, $q_1 = 2, q_2 = 1.8, q_3 = 0.25$;对于复杂功放模型, $q_1 = 1.3, q_2 = 1.9, q_3 = 0.33$ 。简单功放模型和复杂功放模型对应的参数 M_{PA} 、 P 、 L 相同,分别为5、105、64。

3.3 仿真结果

本文仿真了GMP模型、DVR模型、基于一次B样条的分段模型的校正性能,仿真流程如图6所示,并从性能和资源两个角度详细分析了3种数字预失真器的优劣。本次仿真在参数规模(96个参数)相同的情况下,对比3种数字预失真器应用于不同功放模型的性能。图7~图8呈现了简单功放模型下的3种方案校正前后的AM-AM/AM-PM曲线,图9呈现了简单功放模型下的3种方案校正前后的相邻频道泄漏比(adjacent channel leakage ratio, ACLR)性能,图10呈现了简单功放模型下3种方案的收敛速度曲线,图11~图14为复杂功放模型的对应结果。简单功放模型和复杂功放模型对应的3种预失真器的性能,以及3种预失真器不同实现方案所需的资源见表1。

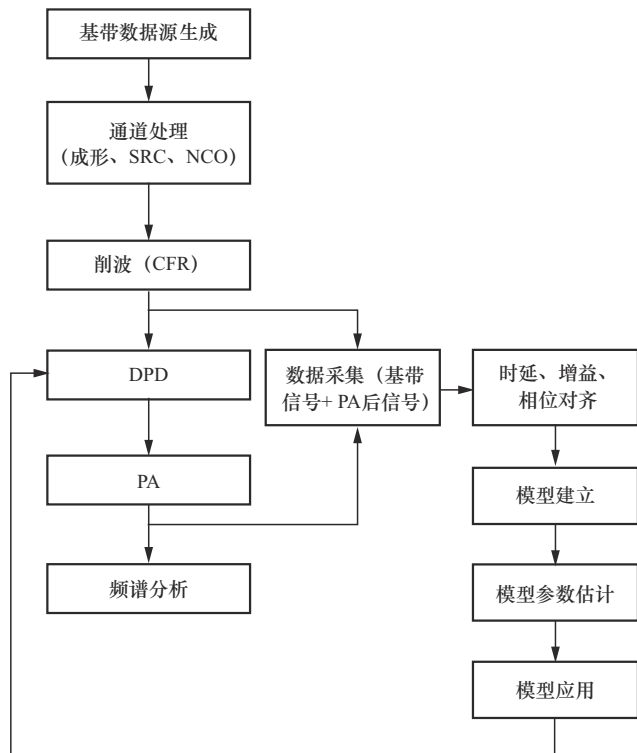


图6 3种数字预失真方案的仿真流程

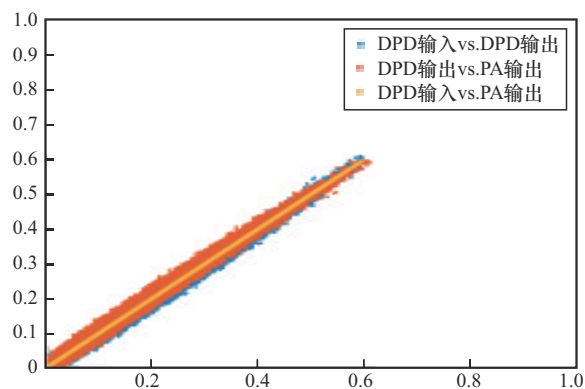


图7 简单功放模型的AM-AM曲线

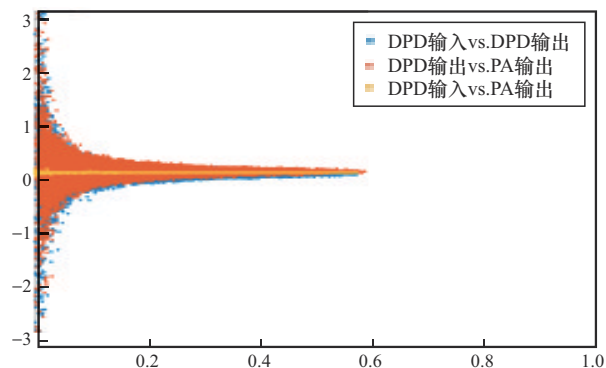


图8 简单功放模型的AM-PM曲线

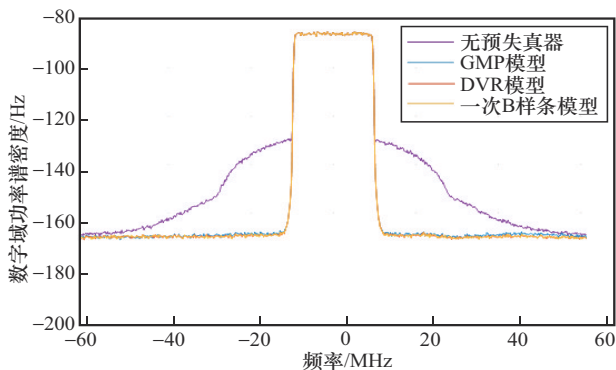


图9 简单功放模型下不同DPD模型校正性能对比（频谱分析）

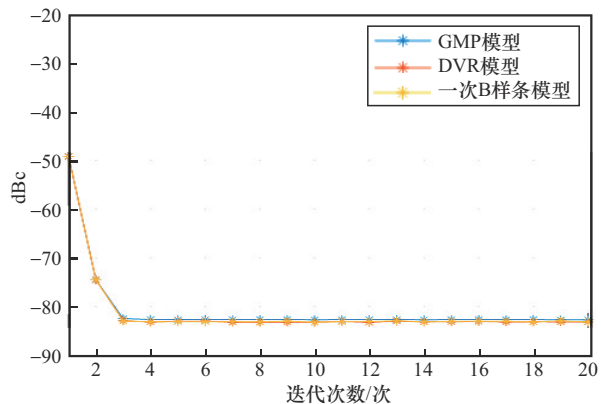


图10 简单功放模型下不同DPD模型收敛性能

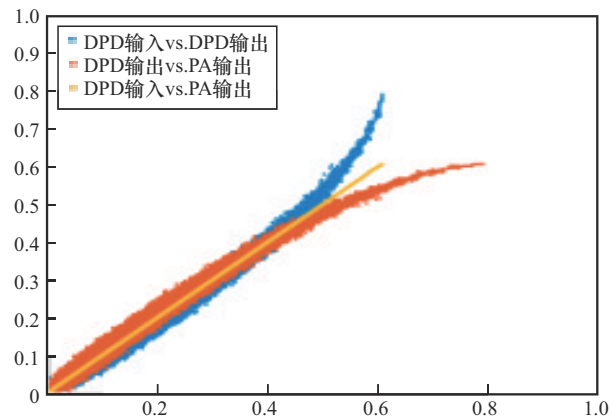


图 11 复杂功放模型的 AM-AM 曲线

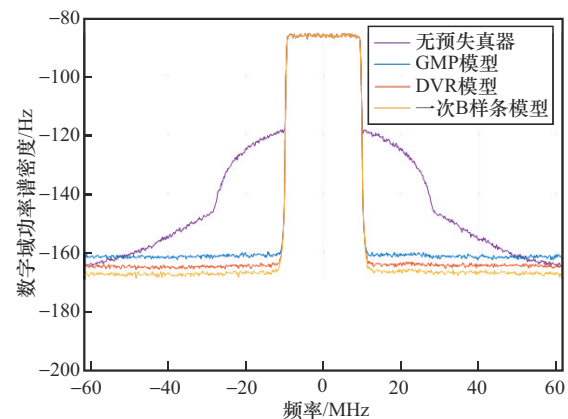


图 13 复杂功放模型下不同 DPD 模型校正性能对比（频谱分析）

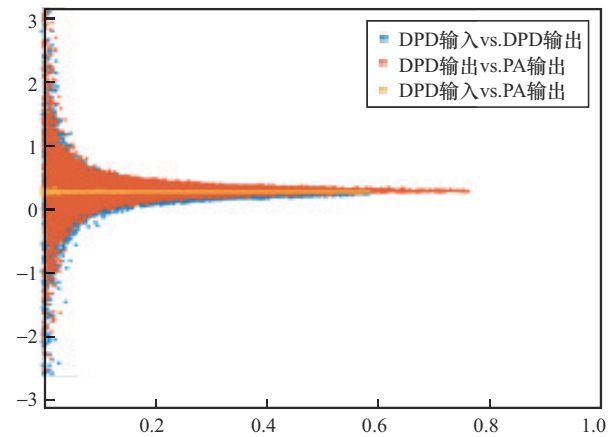


图 12 复杂功放模型的 AM-PM 曲线

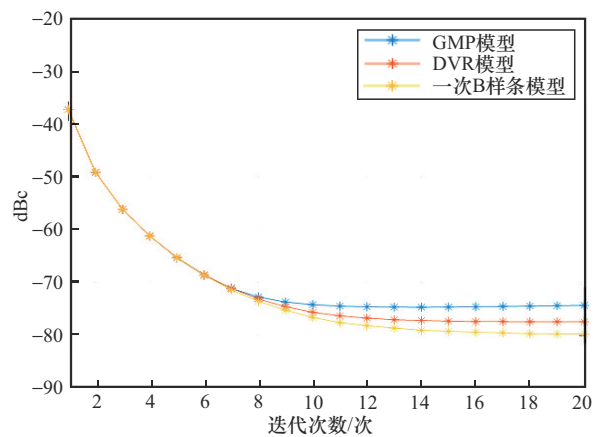


图 14 复杂功放模型下不同 DPD 模型收敛性能

表 1 不同数字预失真器模型校正性能及方案实现所需资源

预失真模型	数字预失真校正性能		乘法器实现方案代价 (乘法器+RAM)	查找表实现方案代价 (乘法器+RAM)
	简单功放模型/-dBc	复杂功放模型/-dBc		
GMP	82.6	74.3	232+RAM32×3	9+RAM1 024×3
DVR	82.9	77.4	201+RAM32×3	9+RAM1 024×3
一次 B 样条	83.1	79.7	15+RAM32×3	9+RAM1 024×3

注：1. 本仿真的 3 种数字预失真器使用了 3 个时延组合，每个时延组合都有 32 个系数，因此总系数个数为 96。2. 乘法器为实数*实数乘法器，RAM 后面的两个数字分别代表需要使用的 1 个 RAM 的深度和 RAM 的个数。

从性能角度看，对于简单功放模型，3 种预失真器的性能基本一致；但是对于复杂功放模型，基于一 次 B 样条的分段模型的数字预失真器性能更优，比 DVR 模型的数字预失真器有 3 dB 左右 的性能收益，比 GMP 模型的数字预失真器有 5 dB 左右 的性能收益。

从资源角度看（忽略幅度和相位计算所需的资源），基于乘法器实现的数字预失真器（如 GMP 和 DVR 模型乘法器）个数相差不大，都在 200 个以上，基于一 次 B 样条的分段模型的乘法器个数仅 15 个，不足另外两种模型乘法器个数的 8%；基于查表方法实现的数字预失真器，3

种方案对逻辑资源的要求基本一致，但是从数学表达式 上看，样条模型对 DSP 计算能力要求较低。

从计算复杂度看，参数估计采用最小二乘法，其 计算复杂度主要取决于求解方法以及问题的规模，本 文对比的 3 种模型的样本数 n 和参数个数 m 均相同，分 别为 4 096 和 96，因此参数估计的计算复杂度相同。

从收敛速度看，3 种数字预失真器的收敛速度均在迭 代 8 次左右到达性能拐点，每次迭代时间在 400 ms 左右， 因此 3 种方法均能在 4s 内基本达到收敛状态。

综上所述，基于一 次 B 样条的分段模型同时具备高

性能及低资源的特性。结合相控阵天线高性能、低成本、低功耗的技术需求,基于FPGA或ASIC等硬化数字电路实现的数字预失真方案的技术选型应同样符合该需求,即保证高校正性能前提下数字资源消耗最少,因此基于一次B样条的分段模型为最优选择。

4 基于一次B样条的分段模型的实测结果

根据第3节的仿真对比可知,一次B样条数字预失真非线性模型在性能和实现复杂度方面的表现都较优。本节介绍基于一次B样条数字预失真非线性模型针对功放实测数字预失真技术对系统指标的改善结果,具体见表2。表2的实测结果显示:在EVM满足8%的要求下,应用数字预失真技术可使PA的输出功率从28.13 dBm抬升到36.23 dBm,抬升量为8 dB左右。根据上述测试结果,可以看出在相同的线性性能下,数字预失真技术应用在数字相控阵天线中可以改善EIRP。以本文测试的功放为例,假设天线阵元数为256,单天线增益为4 dB,当功放输出功率分别为28 dBm和36 dBm时,对应的EIRP分别为80 dBm和88 dBm,也就是说,功放输出功率提升至36 dBm时的EIRP比功放输出功率为28 dBm时提升了8 dB。

表2 基于一次B样条数字预失真非线性模型的实测结果

DPD 状态	输出功率/dBm	EVM	ACLR/dBc
关	28.13	7.72%	-28.5
关	29.10	8.65%	-27.5
关	35.49	10.85%	-23.6
关	36.39	11.38%	-23.1
开	35.66	6.32%	-31.6
开	36.23	7.91%	-27.8

在实测过程中发现,数字预失真技术应用于星载相控阵天线还存在很多工程问题,下面介绍测试过程中遇到的几个关键问题。

(1) 抗辐照CPU的研制。目前市面上可选的支持预失真器参数估计的抗辐照CPU较少,需要研制抗辐照CPU或者研究数字预失真的参数估计硬化技术。

(2) 发射通道隔离度问题。目前国产化的发射器的发射通道间隔隔离度较差,会影响数字预失真技术的应用效果,因此需要优化器件的发射通道间隔隔离度。通过器件本身进行优化的代价太大,可以考虑使用通道泄露校正算法解决该问题。

(3) 功放设计技术与数字预失真技术联合优化。由

于星载相控阵天线应用的功放未与数字预失真技术进行过联合优化设计,因此不能发挥出数字预失真技术的最优效果。如果将功放与数字预失真技术联合优化,则可以在保证性能的同时降低功放的效率,降低整个天线系统的功耗。

5 结束语

本文总结了低轨卫星通信的发展现状及其面临的挑战,针对基于OFDM的卫星通信系统提出了数字预失真技术是解决基于数字波束成形的卫星相控阵天线系统的EIRP和发射线性度矛盾的关键技术之一。针对当前工程应用中的几种主流数字预失真模型,分析了其实现复杂度,并通过建模仿真了各种方案的数字预失真模型的性能。仿真结果表明,基于一次B样条模型的数字预失真模型在具有低实现复杂度的同时又具有较好的性能,更适用于LEO相控阵天线系统。对一次B样条数字预失真非线性模型进行了实测,结果表明,在相同的线性水平下,发射功率可以抬升8 dB,有利于改善整个数字相控阵天线系统的EIRP。最后指出,将数字预失真技术真正应用于星载相控阵天线系统还有很多工程性问题需要解决。

参考文献

- [1] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [2] SIKRI D, JAYASURIYA R M. Multi-beam phased array with full digital beamforming for SATCOM and 5G[J]. Microwave Journal, 2019, 62(4): 64-79.
- [3] SCHETZEN M. The Volterra and wiener theories of nonlinear system[M]. New York: Wiley, 1980.
- [4] BIGLIERI E, BARBERIS S, CATENA M. Analysis and compensation of nonlinearities in digital transmission systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 6(1): 42-51.
- [5] DING L, ZHOU G T, MORGAN D R, et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials[J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(1): 159-165.
- [6] MORGAN D R, MA Z, KIM J, et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10): 3852-3860.
- [7] ZHU A D. Decomposed vector rotation-based behavioral modeling for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(2): 737-744.
- [8] SAFARI N, ROSTE T, FEDORENKO P, et al. An approximation

of Volterra series using delay envelopes, applied to digital predistortion of RF power amplifiers with memory effects[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(2): 115-117.

- [9] 张烈, 冯燕. 线性插值基的数字预失真方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(12): 2376-2380.

ZHANG L, FENG Y. Digital pre-distortion based on linear interpolation basis function[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(12): 2376-2380.

- [10] 刘昕, 陈文华, 吴汇波, 等. 功放数字预失真线性化技术发展趋势与挑战[J]. 中国科学: 信息科学, 2022, 52(4): 569-595.

LIU X, CHEN W H, WU H B, et al. Digital predistortion: development trends and key techniques[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2022, 52(4): 569-595.

- [11] BRIHUEGA A, ABDELAZIZ M, ANTILA L, et al. Mixture of experts approach for piecewise modeling and linearization of RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(1): 380-391.

- [12] LI Y, WANG X Y, PANG J Z, et al. Boosted model tree-based behavioral modeling for digital predistortion of RF power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 69(9): 3976-3988.

[作者简介]



韩晓梦 (1987-), 女, 上海卫星互联网研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为中射频链路数字处理技术、相控阵天线数字处理技术。



王继康 (1979-), 男, 博士, 上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星通信物理层技术、相控阵天线技术。



杨再新 (1989-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为中射频链路数字处理技术、相控阵天线数字处理技术。



李健行 (1990-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为中射频链路数字处理技术、相控阵天线数字处理技术。



王安阳 (1996-), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为中射频链路数字处理技术、相控阵天线数字处理技术。