

大功率毫米波行波管 AM/PM 转换 特性大信号解析理论的研究

邱海舰, 胡玉禄*, 胡 权, 朱小芳, 李 斌
(电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 基于相位展开的欧拉大信号理论, 采用逐次逼近法推导得到场和 AM/PM 转换(输出相位对输入功率的导数)的大信号解析解。以一支 Q 波段毫米波行波管为例, 将大信号解析解与拉格朗日理论以及传统欧拉非线性理论进行对比。结果表明: 大信号解析解的功率、增益和相移以及 AM/PM 转换与拉格朗日理论在线性区和中度相互作用区十分吻合, 饱和增益最大误差小于 8.5%。同时大信号解析解相较于传统的欧拉非线性模型具有更高的精度, 且能表现出饱和现象。

关键词: 毫米波行波管; 注波相互作用; 欧拉流体力学; AM/PM 转换; 大信号解析解
中图分类号: TN124 **文献标识码:** A

Analytic exploration of AM/PM conversion characteristics of high power millimeter-wave traveling wave tubes using Eulerian hydrodynamic analysis

QIU Hai-Jian, HU Yu-Lu*, HU Quan, ZHU Xiao-Fang, LI Bin
(Dept. of School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Based on the phase expansion nonlinear Eulerian beam-wave interaction theory model of millimeter-wave traveling wave tubes, Eulerian large-signal analytic solutions of electric field and AM/PM conversion are obtained by the method of successive approximation. Then, the Eulerian large-signal analytic solutions are compared to a Lagrangian beam-wave interaction theory model and traditional Eulerian nonlinear models. All the simulations are conducted on a set of millimeter-wave traveling wave tube parameters which are based on a single pitch section of a Q-Band traveling wave tube. It is found that the gain, phase and AM/PM conversion of Eulerian large-signal analytic solution agree well with Lagrangian beam-wave interaction theory model before saturation occurs. The maximum error of gain is less than 8.5% near saturation. The Eulerian large-signal analytic solution gain more accuracy than traditional Eulerian models. The present Eulerian large-signal analytic solution can describe saturation effects which is caused by electron overtaking that cannot be found by traditional Eulerian analysis. Results validate the correctness and effectiveness of our Eulerian large-signal analytic solution and the analytic solution of AM/PM conversion.

Key words: millimeter-wave traveling wave tube, beam-wave interaction, Eulerian hydrodynamics, AM/PM conversion, large-signal analytic solution

PACS: 84.40.Fe, 84.40.-x, 07.85.Qe, 52.35.Mw

收稿日期: 2018-01-18 修回日期: 2018-04-11

Received date: 2018-01-18 revised date: 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61771105); 中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2016J065, ZYGX2016J066)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61771105) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2016J065, ZYGX2016J066)

作者简介 (Biography): 邱海舰 (1988-) 男, 四川成都人, 在读博士生, 博士学位, 主要研究领域为微波/毫米波行波管非线性特性的产生机理和抑制方法。E-mail: haijianqiu@foxmail.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yuluhu@uestc.edu.cn

引言

毫米波螺旋线行波管^[1-8]以其大功率、高频率、高效率和宽频带等特点,被广泛应用于毫米波雷达、卫星通信、数据传输系统和机载通信等领域。毫米波螺旋线行波管是未来发展的主力,特别是 Q 波段 V 波段行波管具有潜在的通信市场。随着用户对高速率信息传播需求的日益增长,使得毫米波螺旋线行波管的重要性日益突出。然而毫米波螺旋线行波管中的 AM/PM 转换非线性特性会导致寄生频谱分量的产生^[2],增加系统的误码率^[9],从而影响系统的整体性能。如何抑制毫米波螺旋线行波管的 AM/PM 转换成为一个重要的问题。为解决这个问题,需要利用行波管注波相互作用理论对 AM/PM 转换进行研究。

行波管注波相互作用理论可分为基于欧拉体系的理论模型和基于拉格朗日体系的理论模型。基于拉格朗日体系的理论模型^[10-15]具有计算精确高的特点,然而它往往需要借助于数值计算来实现求解,因而无法对非线性失真机制进行直接分析。基于欧拉体系的理论模型具有形式简单、易于解析求解的特点,因此更适于对行波管非线性失真机制进行解析研究^[16]。一些早期的文献采用基于欧拉体系的理论研究行波管的非线性特性,S. K. Datta 在 Paschke^[17-19]的研究基础上,建立基于欧拉体系的大信号方程组,推导场的三阶逐次逼近解析解^[16,20],并对谐波^[21-23]、三阶互调^[24-25]以及返波振荡^[26]进行解析研究。J. G. Wohlbiel 提出一种多频欧拉非线性理论模型 MUSE 及其简化模型 S-MUSE^[27],利用该模型对相位失真机理^[28-29]进行研究,发现相位失真主要源于电流基波与谐波分量的耦合^[29],而非电子能量的下降^[30-31]。然而,在毫米波行波管相互作用非线性区,这些模型无法对 AM/PM 转换进行模拟。同时这些模型十分复杂,导致无法解析推导 AM/PM 转换,难以实现对 AM/PM 转换物理机制的解析研究。

本文首先对基于相位展开的欧拉大信号注波相互作用模型^[32]进行简化,忽略高于二阶的非线性项,建立了一个简化的欧拉大信号注波相互作用模型。采用逐次逼近法对简化的欧拉大信号注波相互作用模型进行求解,推导得到欧拉大信号解析解。根据欧拉大信号解析解,建立了 AM/PM 转换的解析模型。以 Q 波段毫米波行波管^[8]为例进行大信号分析,将欧拉大信号解析解和 AM/PM 转换的解析模型与基于拉格朗日体系的理论模型^[10,12-13]以及传统的欧拉非

线性模型进行对比。结果表明:在整个频带内,欧拉大信号解析解的增益和相移以及 AM/PM 转换与拉格朗日理论在线性区和中度相互作用区具有很好的一致性,饱和增益最大误差小于 8.5%。同时,相较于传统的欧拉非线性模型,欧拉大信号解析解对非线性区增益和相移的描述更具优势。仿真结果验证了欧拉大信号解析解和 AM/PM 转换解析模型的正确性和有效性。

1 理论模型

1.1 欧拉大信号方程组的化简

本节首先给出了基于电子相位展开的欧拉大信号注波相互作用模型,然后通过对该欧拉大信号注波相互作用模型进行化简,并去掉高于二阶的非线性项,建立了简化的欧拉大信号方程组。

为了建立一套精度更高的基于欧拉体系的大信号注波相互作用理论模型,我们基于精确的拉格朗日体系的理论,将离散的粒子近似处理为流体,得到其连续的电子相位分布函数 $\psi(z)$ 。然后通过对其连续的电子相位分布函数进行傅里叶展开^[20-21],进而建立了欧拉大信号注波相互作用理论模型。这里对 $\psi(z)$ 取傅里叶一阶展开近似:

$$\psi(z) = \phi + A_0(z) + 2|A_1(z)|\cos(\zeta_1 + \phi), \quad (1)$$

其中 ϕ 表示电子相位的初始分布, $A_0(z)$ 和 $A_1(z)$ 分别表示电子相位的零阶和一阶空间谐波, ζ_1 表示 $A_1(z)$ 的幅角。

将式(1)代入拉格朗日理论中的场方程和运动方程,然后对 ϕ 积分,并结合贝塞尔母函数关系式,建立了欧拉大信号注波相互作用模型^[20-21]:

$$\frac{d^2 A_1(z)}{dz^2} = C_1(z) a(z) J_0(|2A_1(z)|) e^{iA_0(z)} - \frac{1}{2} C_Q J_0(|2A_1(z)|) J_1(|2A_1(z)|) e^{i\zeta_1}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \alpha\right) a(z) = i C_2(z) J_1(|2A_1(z)|) e^{-iA_0(z) + i\zeta_1}, \quad (3)$$

$$\frac{d^2 A_0(z)}{dz^2} = C_3(z) J_1(|2A_1(z)|) [a(z) e^{-i\zeta_1 + iA + iA_0(z)} + a^*(z) e^{i\zeta_1 - iA + iA_0(z)}], \quad (4)$$

其中 $a(z)$ 表示归一化场幅值, ω 表示角频率, c_0 表示光速, m_0 和 q_0 分别表示电子的质量和电荷, z 表示轴向位置, v_0 表示电子的初速度, γ_0 表示相对论

因子 k_c 表示冷腔传播常数, K_c 表示线路的耦合阻抗, α 表示衰减常数, I 表示电子注电流, b 表示电子注半径, V_{pc} 表示归一化相速, $J_0(\cdot)$ 和 $J_1(\cdot)$ 分别表示零阶和一阶第一类贝塞尔函数, $I_1(\cdot)$ 表示一阶第一类的变态贝塞尔函数, R' 表示等离子体频率降低因子, $I_A (= m_0 c_0^3 / q_0^2)$, $\theta (= \omega z (1/V_{pc} - 1/v_0))$, $\hat{Q}_q (= 8IcR'/I_A b^2 \omega)$, $e_2(z) (= \sqrt{k_c^2 K_c / 377} e^{i\theta})$. 其中其它系数分别为 $C_1(z) \left(= \frac{i\omega c_0^2}{(\gamma_0 v_0)^3} e_2(z) \right)$, $C_2(z) \left(= \frac{2\pi I}{I_A} e_2^*(z) \right)$, $C_3(z) \left(= -\frac{\omega c^2}{(\gamma_0 v_0)^3} |e_2(z)| \right)$ 和 $C_Q \left(= \frac{\omega c^2}{(\gamma_0 v_0)^3} \hat{Q}_q \right)$.

对方程组中的贝塞尔函数取零阶近似, 并去掉高于二阶的非线性项, 然后将式(2)分别代入式(3)和式(4)化简, 并消去场 $a(z)$, 最终可得:

$$\left[\left(\frac{d^2}{dz^2} + \frac{1}{2} C_Q \right) \left(-i\sigma + \frac{d}{dz} + \alpha \right) - i\varepsilon \right] A_1(z) = i \frac{dA_0(z)}{dz} \left(\frac{d^2 A_1(z)}{dz^2} + \frac{1}{2} C_Q A_1(z) \right), \quad (5)$$

$$\frac{d^2 A_0(z)}{dz^2} = i \left[A_1^*(z) \frac{d^2 A_1(z)}{dz^2} - A_1(z) \frac{d^2 A_1^*(z)}{dz^2} \right], \quad (6)$$

其中 $\varepsilon = \frac{2\pi I}{I_A} \frac{\omega c_0^2}{(\gamma_0 v_0)^3}$. 这样我们建立了简化的欧拉大信号方程组式(5)(6).

1.2 欧拉大信号方程组的求解

本节对方程组进行线性化处理, 得到一阶逼近方程组, 并推导得到方程组的一阶逼近解析解. 然后采用逐次逼近法得到二阶逼近方程组, 并推导得到二阶逼近的解析解. 利用一阶和二阶逼近解析解, 最终得到欧拉大信号解析解, 并推导了功率和增益的解析解.

1.2.1 一阶逼近解析解

方程组的一阶逼近解析解即小信号解析解. 对方程组(5)、(6)进行线性化处理(即将方程组(5)、(6)的右端项令为0), 然后用 $A_{01}(z)$ 和 $A_{11}(z)$ 分别表示电子相位直流分量 $A_0(z)$ 和一阶分量 $A_1(z)$ 的一阶逼近解析解, 整理后得到一阶逼近方程组:

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{d^2}{dz^2} + \frac{1}{2} C_Q \right) \left(-i\sigma + \frac{d}{dz} + \alpha \right) - i\varepsilon \right] A_{11}(z) = 0 \\ \frac{d^2 A_{01}(z)}{dz^2} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式(7)的特征方程为:

$$\gamma^3 + \gamma^2(\alpha - i\sigma) + \gamma \frac{1}{2} C_Q + \left(\frac{1}{2} \alpha C_Q - \frac{i}{2} C_Q \sigma - i\varepsilon \right) = 0, \quad (8)$$

其中 $\sigma = \omega \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_0} \right)$, 是特征方程的根.

在仅考虑增幅波的情况下, 对方程组(7)进行求解, 并结合式(2), 得到一阶逼近方程组的解析解: $A_{01}(z)$, $A_{11}(z)$ 和 $a_1(z)$

$$A_{01}(z) = 0, \quad (9)$$

$$A_{11}(z) = g_3 e^{\gamma z}, \quad (10)$$

$$a_1(z) = E_3 e^{\gamma z - i\sigma z}, \quad (11)$$

其中:

$$g_3 = -\frac{2a_0 C_1(0)}{-4\gamma\alpha + 4i\sigma\gamma - 6\gamma^2 - C_Q}, \quad (12)$$

$$E_3 = \frac{g_3 [2(x + iy)^2 + C_Q]}{2C_1}, \quad (13)$$

其中 $x (= \text{Re}[\gamma])$ 是增幅波特征根的实部, $y (= \text{Im}[\gamma])$ 是增幅波特征根的虚部.

1.2.2 二阶逼近解析解

采用逐次逼近法对方程组(6)(5)的解析解进行推导, 首先在考虑二阶逼近的情况, 方程的解 ($A_0(z)$ 和 $A_1(z)$) 是由一阶和二阶逼近解析解组成:

$$\begin{cases} A_0(z) = A_{01}(z) + A_{02}(z) \\ A_1(z) = A_{11}(z) + A_{12}(z) \end{cases}, \quad (14)$$

其中电子相位直流分量 $A_0(z)$ 的一阶和二阶逼近解析解分别满足: $A_{01}(z) \propto e^{i\sigma z}$ 和 $A_{02}(z) \propto e^{2i\sigma z}$, 电子相位一阶分量的一阶和二阶逼近解析解分别满足: $A_{11}(z) \propto e^{\gamma z}$ 和 $A_{12}(z) \propto e^{2\gamma z}$.

然后将式(14)代入方程(5)、(6)的两端, 分别合并含有 $e^{2\gamma z}$ 或 $e^{2i\sigma z}$ 的项, 化简得到二阶逼近方程:

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{d^2}{dz^2} + \frac{1}{2} C_Q \right) \left(-i\sigma + \frac{d}{dz} + \alpha \right) - i\varepsilon \right] A_{12}(z) = 0 \\ \frac{d^2 A_{02}(z)}{dz^2} = i \left[A_{11}^*(z) \frac{d^2 A_{11}(z)}{dz^2} - A_{11}(z) \frac{d^2 A_{11}^*(z)}{dz^2} \right] \end{cases}. \quad (15)$$

由式(15)可见, 右端的非线性项是由一阶逼近解析解 $A_{11}(z)$ 确定. 对方程(15)组进行求解, 得到二阶逼近解析解:

$$\begin{cases} A_{12}(z) = 0 \\ A_{02}(z) = -\frac{y}{x} e^{2i\sigma z} |g_3|^2 \end{cases}. \quad (16)$$

随后再将一阶逼近解析解 $A_{11}(z)$ 和二阶逼近解析解 $A_{02}(z)$ 代入到式(2), 化简得到场的二阶逼近

解析解 $a_2(z)$:

$$a_2(z) = E_3 e^{yz - i\sigma z} e^{-iA_{02}(z)} \quad (17)$$

由于在一阶和二阶逼近解析解的推导过程中, 两次使用到 $A_{11}(z)$ 的解析解, 相当于使用了两次边界条件. 因此在求总场 $a(z)$ 时, 需要除以边界条件的重复使用次数才能保证增益是从 0 开始. 因此欧拉大信号解析解应写成如下形式:

$$a(z) = [a_1(z) + a_2(z)]/2 \quad (18)$$

将式(11)和式(17)代入到式(18)并化简, 得到归一化场幅值的欧拉大信号解析解:

$$a(z) = E_3 e^{yz - i\sigma z} (1 + e^{-iA_{02}(z)})/2 \quad (19)$$

利用欧拉大信号解析解得到场幅值:

$$|a(z)| = \frac{|E_3|}{2} e^{-\sigma z} \sqrt{2 + 2\cos[A_{02}(z)]} \quad (20)$$

利用功率的定义式 $P = P_0 |a(z)|^2$, 得到功率解析解:

$$P = \frac{1}{2} P_0 |E_3|^2 e^{2xz} [1 + \cos(A_{02}(z))] \quad (21)$$

其中 P_0 是归一化常数

增益的解析解为:

$$G = 101 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2} P_0 |E_3|^2 e^{2xz} [1 + \cos(A_{02}(z))] / P_{in} \right\} \quad (22)$$

其中 P_{in} 是信号输入功率.

1.3 AM/PM 转换的解析解模型

本节将利用欧拉大信号解析对 AM/PM 转换的解析解进行推导. 并得到了 AM/PM 转换与电子相位的关系. 根据 AM/PM 转换的定义式, 在 AM/PM 转换的解析解的推导过程中, 须首先推导出场(19)的非线性相移 Φ 解析表达式. 因此, 令系数 E_3 的相位为 ϕ_1 , 于是:

$$E_3 = |E_3| e^{i\phi_1} \quad (23)$$

又因为 $e^{yz - i\sigma z}$ 的相位为 $yz - \sigma z$, $(1 + e^{-iA_{02}(z)})$ 的相位为 $-\arctan\left[\frac{\sin(A_{02}(z))}{1 + \cos(A_{02}(z))}\right]$. 因此, 可得到非线性相移 Φ 的解析表达式:

$$\Phi = \frac{180}{\pi} \left\{ yz - \sigma z + \phi_2 - \arctan\left[\frac{\sin(A_{02}(z))}{1 + \cos(A_{02}(z))}\right] \right\} \quad (24)$$

最后, 利用 AM/PM 转换的定义式(即 Φ 对输入功率 P_{in} 求偏导数) 并结合和差化积公式, 建立了

AM/PM 转换的解析解模型:

$$\text{AM/PM} = -\frac{9\ln(10) A_{02}(z)}{\pi} \quad (25)$$

从 AM/PM 转换的解析解式(25)可以看出, AM/PM 转换的产生与电子相位直流分量 $A_{02}(z)$ 的激励成正比.

2 数值分析

采用逐次逼近法, 推导得到欧拉大信号方程组的大信号解析解式(19), 然后利用该解析解推导了 AM/PM 转换的解析解. 首先, 为验证欧拉大信号解析解以及 AM/PM 转换解析模型的正确性和有效性, 我们将其与精确的拉格朗日理论模型进行对比. 然后, 为验证欧拉大信号解析解相对传统欧拉模型在非线形区对增益和相移的描述更具优势, 我们将其与传统的欧拉模型进行对比(Pierce 小信号理论合 Datta 的欧拉大信号方程组).

2.1 模拟结构

以一支 Q 波段的毫米波螺旋线行波管模型^[8]为例进行大信号分析, 其相互作用结构采用均匀螺距分布, 高频结构见图 1. 高频结构采用无翼片品型夹持杆, 高频结构参数见表 1. 电参数见表 2. 电子注填充比为 0.4.

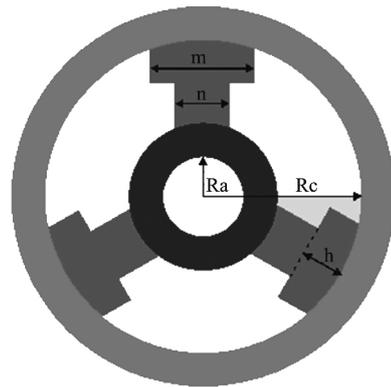


图 1 高频结构

Fig. 1 Q-band helix slow-wave circuit of the prototype tube

表 1 毫米波行波管高频结构参数

Table 1 Millimeter-wave traveling-wave tube circuit parameters

结构参数/mm	螺距	螺旋线内径	螺旋线厚度	螺旋线宽度
Q 波段行波管	0.41	0.26	0.05	0.2
结构参数/mm	管壳半径/Rc	夹持杆/n	夹持杆/m	夹持杆/h
Q 波段行波管	0.65	0.1	0.25	0.12

表 2 毫米波行波管电参数

Table 2 Millimeter-wave traveling-wave tube beam parameters

电参数	频率范围/GHz	电压/V	电流/mA	电子注半径/mm
Q 波段行波管	43.5 ~ 45.5	13 500	90	0.104

2.2 欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的对比

2.2.1 单频计算对比

为验证欧拉大信号解析解式的正确性和有效性,图 2 ~ 图 3 对比了中心频率处(频率为 44.5 GHz)欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的功率、增益及相位.从图中可见:欧拉大信号解析解的功率、增益及相位与拉格朗日理论模型在线性区到中度交互作用区(相移在 $[0.03 \text{ m}, 0.07 \text{ m}]$ 之间,功率和增益在 $[0.03 \text{ m}, 0.084 \text{ m}]$ 之间)的计算结果十分吻合.但随着饱和现象的出现,二者的功率、增益以及相移开始出现差异.

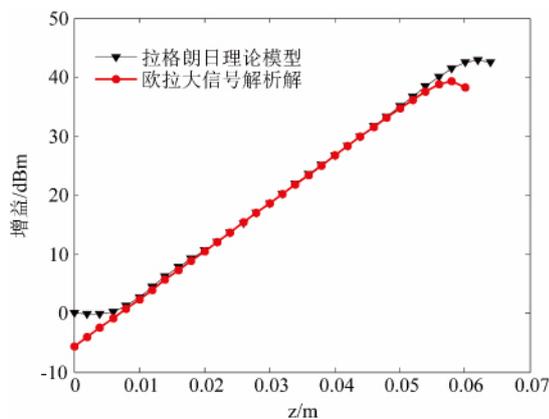


图 2 欧拉大信号解析解和拉格朗日理论模型的增益曲线随轴分布曲线

Fig. 2 Gain versus axial distance for Lagrangian beam-wave interaction theory model and Eulerian large-signal analytic solution

2.2.2 功率扫描计算对比

在功率扫描的情况下(从饱和输入功率回退 20 dB 开始扫描,即扫描范围为 -10 dBm 到 10 dBm ,频率为 44.5 GHz),对比欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的输入输出特性曲线(即输出功率随输入功率变化的曲线和 AM/PM 转换曲线式,见图 4 ~ 图 5).二者的增益曲线在 $[-10 \text{ dBm}, 5 \text{ dBm}]$ 之间非常一致.二者的 AM/PM 转换曲线在 $[-10 \text{ dBm}, 9 \text{ dBm}]$ 之间非常一致.仿真对比结果证明了 AM/PM 转换解析模型式的正确性和有效性.

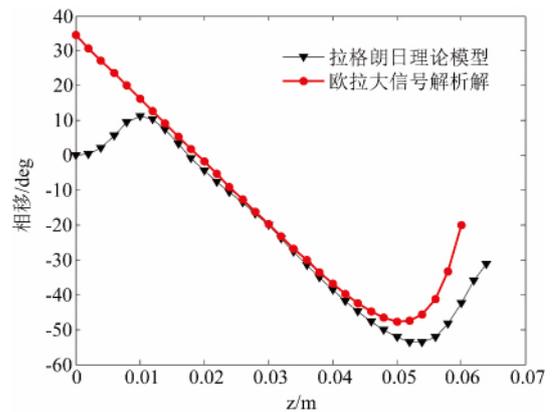


图 3 欧拉大信号解析解和拉格朗日理论模型的相移曲线随轴分布曲线

Fig. 3 Phase versus axial distance for Lagrangian beam-wave interaction theory model and Eulerian large-signal analytic solution

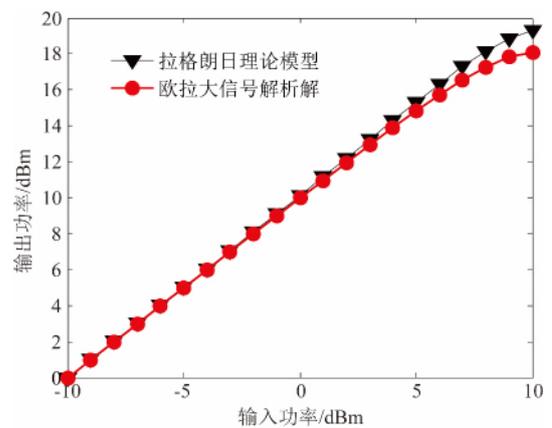


图 4 欧拉大信号解析解和拉格朗日理论模型的归一化增益随输入功率分布曲线

Fig. 4 Normalized gain versus input power for Lagrangian beam-wave interaction theory model and Eulerian large-signal analytic solution

2.2.3 频率扫描计算对比

在频率扫描的情况下(扫描范围为 43.5 GHz 到 45.5 GHz),图 6 和图 7 对比了饱和位置处欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的增益和归一化相移随频率的变化曲线.从图中可以看出二者的增益和归一化相移随频率的变化规律十分吻合,且最大增益误差小于 8.5%,最大相移误差小于 15%.对二者的误差进行分析,发现误差主要源自两个方面:1) 电子相位的傅里叶展开式仅考虑了零阶和一阶分量,忽略了二阶及二阶以上分量对注波互作用的影响;2) 简化的欧拉大信号方程组忽略了高于二阶的非线性项;3) 欧拉大信号解析解只考虑到二阶逼近的解析解(难以推导出三阶即以上分量的解析

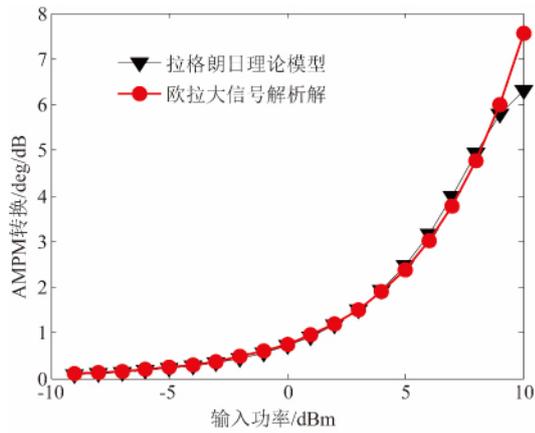


图5 欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的 AM/PM 转换曲线对比图
 Fig. 5 The comparison of Lagrangian beam-wave interaction theory model and Eulerian large-signal analytic solution for AM/PM conversion

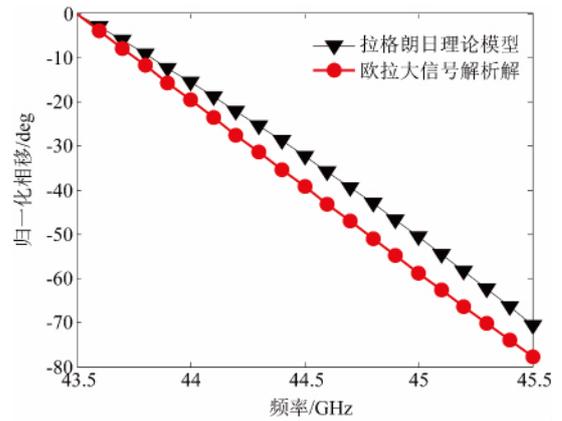


图7 不同频率时 欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的归一化相移曲线对比图
 Fig. 7 The comparison of Lagrangian beam-wave interaction theory model and Eulerian large-signal analytic solution for normalized phase at different frequencies

解). 为提高精度, 后续工作将尝试去掉这些近似处理以得到精度更高的解析解.

综上所述: 仿真对比结果证明了欧拉大信号解析解和 AM/PM 转换解析模型在线性区到中度相互作用区的正确性和有效性. 该解析模型可用于对毫米波行波管 AM/PM 转换特性产生机理和抑制方法的研究.

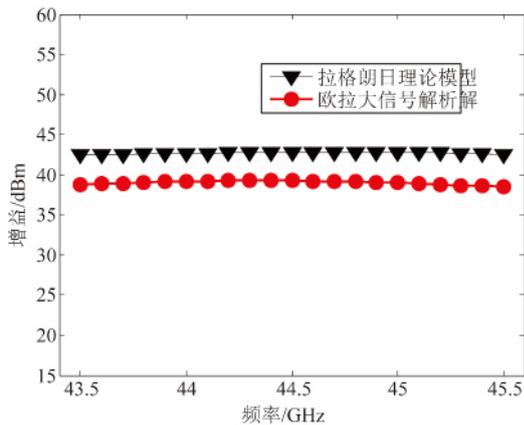


图6 不同频率时 欧拉大信号解析解与拉格朗日理论模型的增益曲线对比图
 Fig. 6 The comparison of Lagrangian beam-wave interaction theory model and Eulerian large-signal analytic solution for gain at different frequencies

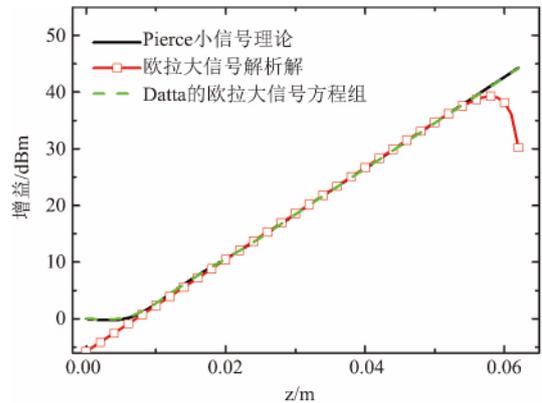


图8 欧拉大信号解析解、Pierce 小信号理论、Datta 的欧拉大信号方程组的增益随轴分布曲线
 Fig. 8 Gain versus axial distance for Pierce small-signal theory, Eulerian large-signal analytic solution and Datta's Eulerian nonlinear beam-wave interaction theory model

2.3 欧拉大信号解析解与传统欧拉理论模型的对比

图8、图9 对比了 44.5 GHz 时欧拉大信号解析解与传统的欧拉模型的增益和场相位随轴分布曲线. 由图8 可见, 欧拉大信号解析解的增益与传统的

欧拉模型在线性区的计算结果十分吻合; 而在非线性区, 欧拉大信号解析解的增益与传统的欧拉模型的计算结果出现差异, 其增益将随轴向位置 z 的增加发生增益压缩特性, 并呈现出饱和状态. 从图9 可以看出, 欧拉大信号解析解的相移与 Pierce 小信号理论以及 Datta 的欧拉大信号方程组在线性区的计算结果十分吻合; 在非线性区, 相移出现差异, 随着轴向位置 z 的增加欧拉大信号解析解的相移偏离线性区反向增长, 呈现出较强的相位失真特性. 仿真结果表明: 欧拉大信号解析解相对传统欧拉模型在非线性区对增益和相移非线性特性的描述更具优势. 因此, 欧拉大信号解析解更适于对 AM/PM 转换等非线性特性进行分析和研究.

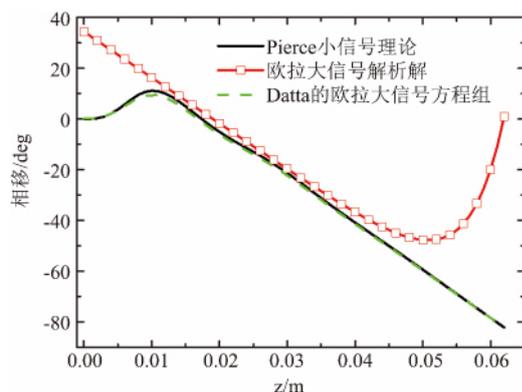


图9 欧拉大信号解析解、Pierce 小信号理论和 Datta 的欧拉大信号方程组的相移随轴分布曲线

Fig. 9 Phase versus axial distance for Pierce small-signal theory, Eulerian large-signal analytic solution and Datta's Eulerian nonlinear beam-wave interaction theory model

3 结论

首先对基于相位展开的行波管欧拉大信号理论模型进行近似处理,忽略高于二阶的非线性项的影响,建立了一个简化的欧拉大信号理论模型.然后,采用逐次逼近法,对该简化的欧拉大信号注波相互作用理论进行求解,首次得到欧拉大信号解析解.该解析解形式简单,易于对非线性现象进行解析研究.进一步利用欧拉大信号解析解推导得到 AM/PM 转换的解析解,并发现 AM/PM 转换的产生与电子相位直流分量的激励成正比.最后,应用欧拉大信号解析解和 AM/PM 转换解析模型对一支 Q 波段毫米波螺旋线行波管进行大信号分析,并与拉格朗日理论模型以及传统的欧拉非线性模型进行对比.结果表明:欧拉大信号解析解的功率、增益、相移以及 AM/PM 转换与拉格朗日理论在线性区和中度相互作用区十分吻合.在饱和位置处,欧拉大信号解析解与拉格朗日理论的增益最大误差小于 8.5%,相移最大误差小于 15%.同时,相较于传统的欧拉非线性模型,欧拉大信号解析解对非线性区增益和相移非线性特性的描述更具优势(不但具有更高的精度,而且还表现出传统欧拉非线性模型无法描述的增益压缩和相位失真现象).仿真结果验证了欧拉大信号解析解在线性区到中度相互作用区的正确性和有效性.该欧拉大信号解析模型为行波管非线性失真机制的研究奠定了理论基础.然而为了便于求解,在 AM/PM 转换解析模型建立的过程中,忽略了电子相位的一阶以上傅里叶展开分量、方程组的二阶以上非线性项以

及场的二阶以上逐次逼近解析解,因此 AM/PM 转换解析模型和欧拉大信号解析解的计算精度有待提高.后续工作还需对此毫米波行波管欧拉大信号解析理论进行深入研究和拓展,以建立精度更高的 AM/PM 转换解析模型,并利用该解析模型研究 AM/PM 转换的物理机制与抑制方法.

References

- [1] Datta S K, Jayashree E V, Veena S D, et al. Analysis of a Chiral Dielectric Supported Broadband Helix Slow-Wave Structure for Millimeter-Wave TWTs [J]. *International Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2007, **28**(9): 779-787.
- [2] Berman A, Mahle C E. Nonlinear Phase Shift in Traveling-Wave Tubes as Applied to Multiple Access Communications Satellites [J]. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 1970, **18**(1): 37-48.
- [3] Chong C K, Davis J A, Borgne R H L, et al. Development of high power Ka-band and Q-band helix-TWTs [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, CA, 2004, 16-17.
- [4] Chong C K, Davis J A, Borgne R H L, et al. Development of high-power Ka-band and Q-band helix-TWTs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, **52**(5): 653-659.
- [5] Chong C K, Davis J A, Forster J, et al. High power Ka-band and Q-band helix-traveling wave tubes for communications and radar applications [C]. *IEEE Military Communications Conference*, Atlantic City, NJ, 2005, 1926-1930.
- [6] Chong C K, Dawson R C, Forster J W, et al. Development of 500 W Ka-band helix-TWT and 200 W Q-Band helix-TWT for communications applications [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, CA, 2008, 191-192.
- [7] Chong C K, Menninger W L. Latest Advancements in High-Power Millimeter-Wave Helix TWTs [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, **38**(6): 1227-1238.
- [8] Liu M, Cai S, Feng J. Design and simulation of a Q-Band helix TWT [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey, CA, 2012, 293-294.
- [9] Abe D K, Levush B, Antonsen T M, et al. Design of a linear C-band helix TWT for digital communications experiments using the CHRISTINE suite of large-signal codes [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(3): 1053-1062.
- [10] Chernin D, Antonsen T M, Levush B, et al. A three-dimensional multifrequency large signal model for helix traveling wave tubes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, **48**(1): 3-11.
- [11] Hu Y, Yang Z, Li J, et al. Backward-wave oscillation suppression in high-power broadband helix traveling-wave tubes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(5): 1562-1569.
- [12] Li B, Yang Z H, Li J Q, et al. Theory and Design of Microwave-Tube Simulator Suite [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, **56**(5): 919-927.
- [13] Li B, Li J Q, Hu Q, et al. Recent Developments to the Microwave Tube Simulator Suite [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2014, **61**(6): 1735-1741.

- [14] Rao E V R N , Venkateswarlu D S. One Dimensional Large Signal Analysis for Helix TWTs and Multicavity Klystrons [J]. *Iete Journal of Research* , 2015 , **40**(1) : 11-15.
- [15] Srivastava V. 2. 5-Dimensional Multi-Signal Large-Signal Analysis of Helix TWTs [J]. *Iete Journal of Research* , 2015 , **49**(4) : 239-246.
- [16] Datta S , Jain P , Narayan M R , *et al.* Nonlinear Eulerian hydrodynamical analysis of helix traveling-wave tubes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 1998 , **45** (9) : 2055-2062.
- [17] Paschke F. On the nonlinear behavior of electron-beam devices [J]. *RCA Rev* , 1957 , 18(221-242).
- [18] Paschke F. Nonlinear theory of a velocity-modulated electron beam with finite diameter [J]. *RCA REVIEW* , 1960 , **21**(1) : 53-74.
- [19] Paschke F. Generation of second harmonic in a velocity-modulated electron beam of finite diameter [J]. *RCA REVIEW* , 1958 , **19**(4) : 617-627.
- [20] Datta S K , Jain P K , Basu B N. Third-order saturation effects in a helix traveling-wave tube under Eulerian approximations [J]. *Microwave & Optical Technology Letters* , 1997 , **16**(6) : 345-349.
- [21] Datta S. Eulerian analysis for harmonic generation and its control in a helix travelling-wave tube [J]. *International journal of electronics* , 1998 , **85**(3) : 377-395.
- [22] Datta S , Reddy S , Jain P , *et al.* Nonlinear Eulerian analysis of harmonic generation in traveling-wave tubes [J]. *International journal of infrared and millimeter waves* , 1999 , **20**(3) : 483-490.
- [23] Datta S K , Jain P K , Narayan R , *et al.* Nonlinear Eulerian hydrodynamical analysis of helix traveling-wave tubes for harmonic generation and its control [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 1999 , **46**(2) : 420-426.
- [24] Datta S K , Jain P K , Rajnarayan M D , *et al.* A simple Eulerian analysis of IM3 distortion in helix traveling-wave tubes [J]. *Microwave & Optical Technology Letters* , 1999 , **22**(6) : 405-408.
- [25] Datta S , Jain P , Basu B. Control of IM3 distortion in helix TWTs by harmonic injection—an Eulerian hydrodynamical study [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 2001 , **48**(1) : 62-67.
- [26] Datta S K , Kumar L , Basu B N. A simple closed-form formula for backward-wave start-oscillation condition for millimeter-wave helix TWTs [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* , 2008 , **29**(6) : 608-616.
- [27] Wohlbiel J G , Booske J H , Dobson I. The multifrequency spectral Eulerian (MUSE) model of a traveling wave tube [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science* , 2002 , **30** (3) : 1063-1075.
- [28] Wohlbiel J G , Booske J H. Mechanisms for phase distortion in a traveling wave tube [J]. *Physical Review E* , 2004 , **69**(6) .
- [29] Wohlbiel J , Booske J , Dobson I. A new view of phase distortion in a traveling wave tube [C]. *IEEE International Conference on Vacuum Electronics* , Seoul , South Korea , 2003 , 328-329.
- [30] Ezura E , Kano T. Measured and theoretical nonlinear phase distortion in traveling-wave tubes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices* , 2005 , **22**(10) : 890-897.
- [31] Gilmour A S. Principles of traveling wave tubes. Norwood [J]. MA: ARTECHHOUSE , INC , 1994. 1-390.
- [32] Hu Y , Yang Z H , Li J , *et al.* A nonlinear Eulerian theory with phase expansion for traveling wave tubes [C]. *IEEE International Vacuum Electronics Conference* , Beijing , China , 2015 , 1-2.