

文章编号 1005-0388(2002)02-0187-05

快速计算通信天线宽频带内的电特性*

贺秀莲 龚书喜 纪奕才 刘其中

(西安电子科技大学天线与电磁散射研究所, 陕西 西安 710071)

摘要 在分析通信天线宽频带内的特性时, 一般需要选取许多频点采用矩量法逐点求解天线上的电流分布, 计算时间长。研究了一种对电流系数矩阵 $[I]$ 进行频域插值的方法来快速分析天线宽频带内的电特性。该方法先利用矩量法直接求出少数较大间隔的频率点上的电流展开系数矩阵 $[I]$, 然后利用这些采样频点上的 $[I]$ 矩阵来插值计算其它频点上的电流展开系数矩阵的元素。采用该方法分析了几个不同天线, 与直接采用矩量法计算相比, 该方法计算时间显著减少, 计算误差很小。

关键词 天线, 矩量法, 电流系数矩阵, 插值

中图分类号 TN821 文献标识码 B

Efficient broadband evaluation of communication antennas

He Xiu-lian Gong Shu-xi Ji Yi-cai Liu Qi-zhong

(Research Inst. of antennas and EM scattering, Xidian Univ.,
Xi'an shanxi 710071, China)

Abstract The evaluation of the broadband performance of communication antennas using the method of moments (MOM) needs a long time since the current distribution must be computed for each frequency. This paper presents an efficient method for the computation of the antenna broadband performance using frequency interpolation of current coefficient matrix $[I]$. With this method, the elements of a few matrices $[I]$ at relatively large frequency intervals are directly computed from MOM. These matrices are then used to interpolate the elements of other matrices $[I]$ at the intermediate frequencies. As examples, several different antennas are analyzed by this method. Compared to direct MOM, CPU time of this method is significantly reduced and the errors are very small.

Key words antenna, method of moments, current coefficient matrix, interpolation

1 引言

在通信天线的分析与设计中, 多采用矩量法^[1,2]来求解天线表面电流密度满足的电场积分方程。矩量法中的阻抗矩阵的填充和求逆是很耗费时间的过程, 同时为了得到天线较宽频带内的电特性, 需要在带内选取很多频点, 这样就需要用矩量法求解每个频点上的阻抗矩阵并求解线性方程组, 这样需要很

长的计算时间, 给快速分析和设计通信天线带来了困难。为了解决这一问题, 许多学者提出了各种插值方法来提高计算速度。E. H. Newman 等提出了 $[Z]$ 矩阵插值的方法^[3], 该方法对三个频点上的阻抗矩阵进行二次插值来生成其它频点上的阻抗矩阵, 取得较好的效果, 但每个频点还需要矩阵求逆计算, 计算时间较长。文献^[4]深入研究了 $[Z]$ 矩阵插值方法, 并讨论了对导纳矩阵 $[Y]$ 进行插值的方法,

节省了计算时间,但是该方法对每个导纳矩阵元素插值,当导纳矩阵维数较大时,计算量也是很大的。在文献[5~7]中 Miller 将各种插值方法都归结为基于模型的参数估计技术(Model-Based Parameter Estimation),详细地论述了该技术的理论,讨论了多种可用来插值的函数,并给出了该技术在时域、频域及空域等方面的各种各样的应用实例,成为了该项技术的理论基础。文献[8]在 Miller 的基础上介绍了一种在频域和时域同时进行插值的技术来计算任意频点的辐射方向图。从矩量法的操作过程可以看出,矩量法的主要问题是求解电流展开系数矩阵[I],得到电流展开系数后就可以很快得到天线的各种特性。本文在前面所述的 MBPE 技术的基础上研究了一种直接对电流展开系数矩阵[I]进行插值的方法,并用来分析几个常用天线的电特性。与直接计算相比,该方法直接插值得到电流系数矩阵,求逆次数和插值对象都很少,计算速度快,误差极小,可以用于天线的工程设计。

2 电流系数矩阵插值法

在采用矩量法分析天线时,其主要过程是生成一个线性方程组

$$\sum_{n=1}^{N_s} Z_{mn}(f) I_n(f) = V_m(f), \quad m = 1, 2, \dots, N_s \quad (1)$$

或写成

$$[Z][I] = [V] \quad (2)$$

求解该线性方程组就可以求得电流展开系数 $I_n(f)$ 亦即求得了天线上的分布电流,然后就可以进一步分析天线的其它电特性。可以说,如何快速精确求得电流展开系数是矩量法的核心问题。

从式(1)可以看出,阻抗矩阵、电流系数矩阵以及电压矩阵都是关于频率 f 的函数。为了快速分析天线工作频带内的电特性,减少带内采样点数,一些学者提出了各种在频域进行插值的方法。其中最有代表性的是 Newman 等人提出的[Z]矩阵插值法^[3] 和 Virga 提出的[Y]矩阵插值法^[4],如引言所述这两种方法虽然在一定程度上提高了计算速度,但还是不尽人意。本文在此基础上,进一步研究对电流系数矩阵[I]进行插值的方法,这使得矩量法和频域插值相结合的方法进一步完善。

对物理模型的特性曲线进行插值时要选用合适的插值函数,要求其比较符合模型的特性,而且所需的插值系数不多。许多情况下泰勒级数展开就能获

得很好的结果,但是当被插值函数存在极点或奇异点时,很难收敛,而 Padé 有理函数展开可以克服这一缺陷^[9,10]。使用 Padé 函数,被插值函数可以展开为

$$F(f) = \frac{N(f)}{D(f)} = \frac{a_0 + a_1 f + a_2 f^2 + \dots + a_p f^p}{1 + b_1 f + b_2 f^2 + \dots + b_d f^d} \quad (3)$$

式中, f 代表频率, a_i 和 b_j 分别为分子和分母多项式的待定系数,共有 $Nf = p + d + 1$ 个。该函数具有很好的自适应特性,与泰勒级数展开相比, Padé 展开所需系数少,收敛速度快,而且具有较大的收敛半径,因此比泰勒级数展开具有更大的插值范围^[10],能够准确地对各种不同物理模型的特性曲线进行插值,在[Y]矩阵插值法及文献[6~10]中都得到了很好的应用。

对 Padé 有理分式函数的系数求解的方法有两种:一种是求得 $F(f)$ 在某一点 f_0 上值 $F(f_0)$ 及其各阶导数 $F^{(n)}(f_0)$ 的值,然后来求得各个系数,但当电流展开函数和检验函数很复杂时,这种求系数的方法是很困难的。另一种方法是在 $F(f)$ 的定义域内选取 Nf 个采样点,计算得到各点上的值后来求解待定系数。本文所关心的是天线计算问题,采用分段正弦基伽略金法来求解天线电流,其阻抗矩阵元素不能解析表示,对其求导是很复杂的,因此采用第二种方法来求解展开系数,具体如下。

在所关心的频带内选取 Nf 个采样点,代入式(3),经推导可得一线性方程组

$$Ax = q \quad (4)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & f_1 & \dots & f_1^p & -F(f_1)f_1 \\ 1 & f_2 & \dots & f_2^p & -F(f_2)f_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & f_{Nf} & \dots & f_{Nf}^p & -F(f_{Nf})f_{Nf} \\ -F(f_1)f_1^2 & \dots & -F(f_1)f_1^d & & \\ -F(f_2)f_2^2 & \dots & -F(f_2)f_2^d & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \\ -F(f_{Nf})f_{Nf}^2 & \dots & -F(f_{Nf})f_{Nf}^d & & \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$q = \begin{bmatrix} F(f_1) \\ F(f_2) \\ \vdots \\ F(f_{Nf}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

求解该矩阵方程就可以得到(3)式分子和分母多项式的展开系数。

根据 Padé 逼近的最佳一致性理论,当系数 p 和 d 满足 $p=d$ 或者 $|p-d|=1$ 时,插值的误差最小^[9]。在对电流展开系数插值时,首先采用矩量法计算出所关心的频带内的 N_f 个采样点上的天线分布电流系数矩阵 $[I]^i, i=1, 2, \dots, N_f$, 然后分别对电流系数矩阵的每个元素 $I_n(f)$ 进行式(3~7)的操作,就可以精确地求出该天线工作频带内的每个频点的电流展开系数。

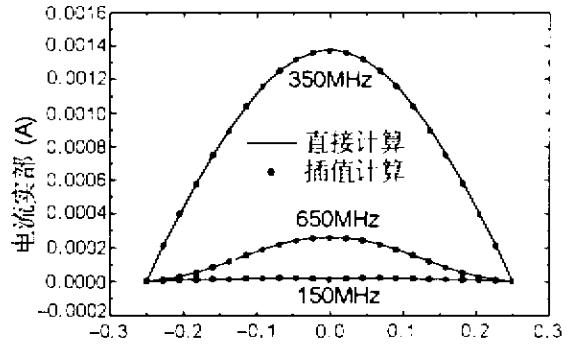
3 数值结果

本文分别计算了对称振子、开式套筒和三元引向天线三个算例,都得到了较好的结果。选取采样点时,分别取上所关心频带的起始频率和截止频率,其它采样频点在带内较为均匀地选取。

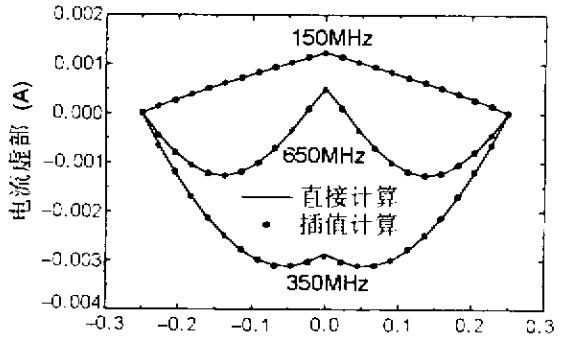
3.1 对称振子

首先以最简单的对称振子为例,天线的长度为 0.5m,振子半径为 0.0001m,计算其在 100~900MHz 范围内的电流系数。插值时取 $p=3, d=4$,即需选取 8 个采样点,分别为 100MHz、200MHz、300 MHz、450 MHz、600 MHz、700 MHz、800MHz 和 900 MHz。将天线分为 22 段,采用矩量法分别求解这 8 个频点上的电流系数矩阵,然后进行插值。计算采样点的电流系数矩阵时,本文采用的是分段正弦基展开伽略金法检验的矩量法。根据对称性只要对前 11 个元素进行插值。图 1 给出了对称振子分别在 150MHz、350MHz 及 650MHz 三个频点上的电流分布的插值计算结果,与矩量法直接计算的结果吻合很好。由插值计算所得的各频点上电流求得了对称振子的输入阻抗,如图 2 所示,插值计算结果和矩量法计算结果吻合良好。在该频带内矩量法需要每隔 10MHz 计算一个频点,即要计算 81 个频点,才能把握天线频带内的电特性;而插值计算只需先采用矩量法计算 8 个采样点上的电流系数矩阵,然后进行对矩阵的前 11 个元素在频域内插值。下面比较

一下两种方法在奔腾 200 的计算机上的运行时间,采用矩量法直接计算时在频带内取 81 个频点,总的计算时间为 8.91s;而插值计算中直接计算 8 个采样点的电流系数矩阵的时间为 0.87s,插值计算的时间仅为 0.05s,总的计算时间为 0.92s。可见插值过程的简单快捷使计算速度提高了近十倍。



(a) 电流实部



(b) 电流虚部

图 1 对称振子的电流分布

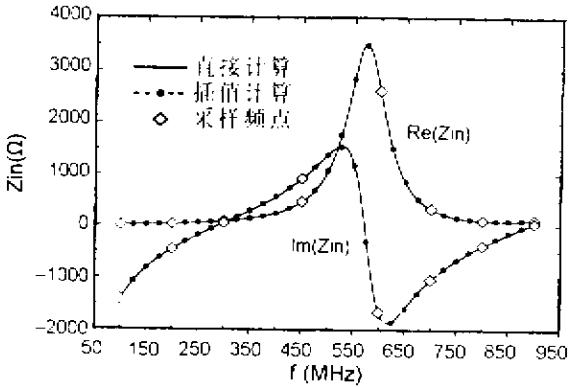


图 2 对称振子的输入阻抗

3.2 开式套筒

图 3 和图 4 分别给出了一个开式套筒的输入阻

抗及输入驻波比和功率增益的曲线。开式套简单极子天线的结构参数为:主振子高度为 0.139m,两个寄生振子的高度为 0.06m,主振子和寄生振子的间距为 0.019m,振子半径为 0.0035m,工作频带为 450~1100MHz。插值计算时取 $p=2, d=3$,选取插值频点分别为 450MHz、550MHz、700MHz、900MHz、1000MHz 和 1100MHz 等 6 个频点,也获得十分好的结果。图 3 和图 4 示出插值方法计算所得的开式套简单极子的输入阻抗、输入驻波比以及功率增益,与矩量法直接计算所得的结果吻合很好。图中直接用矩量法计算的结果也是每 10MHz 计算一个点即采样点数为 66 个,插值计算只需计算 6 个频点,使计算速度提高了十倍多。

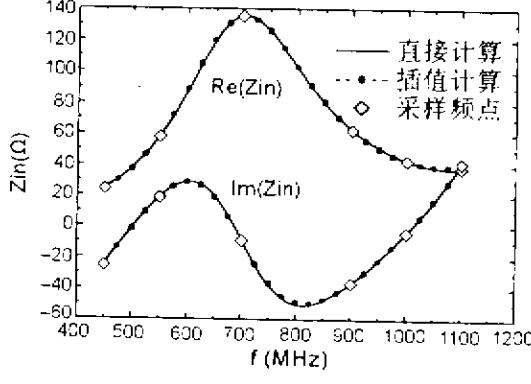


图 3 开式套简单极子的输入阻抗

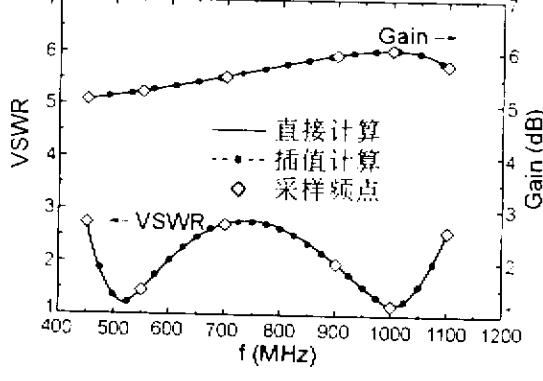


图 4 开式套简单极子的输入驻波比和增益

3.3 引向天线

本文另一个算例是工作在 2900~3100MHz 的三元引向天线。天线的结构参数:反射振子的长度为 0.0474m,有源振子的长度为 0.0433m,引向振子的长度为 0.0429m,振子间距都为 0.026m,振子半径都为 0.0005m。插值时取 $p=1, d=2$,采样频点为

2900MHz、2960MHz、3070MHz 和 3100MHz 等 4 个频点,插值计算求得电流系数矩阵后,利用分布电流分别求出引向天线的输入阻抗、输入驻波比、功率增益以及辐射方向图。如图 5 和图 6 所示,插值方法计算所得的引向天线的输入阻抗、输入驻波比以及功率增益,与矩量法直接计算所得的结果吻合很好。图中直接用矩量法计算的结果也是每 10MHz 计算一个频点即采样点数为 66 个,插值计算只需计算 4 个频点,使计算速度提高了五倍多。

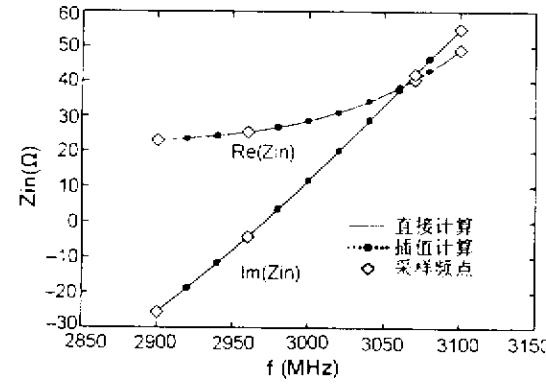


图 5 引向天线的输入阻抗

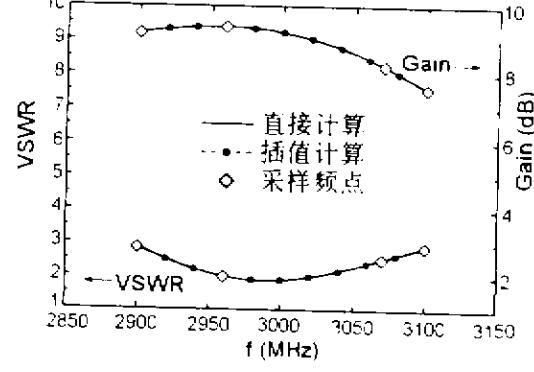


图 6 引向天线的输入驻波比和增益

从以上三个例子可以看出,采用 $[I]$ 矩阵插值的方法加快了计算速度。在实际计算过程中可以看出插值的系数越多精度越高,但当系数达到一定数值时插值结果已经收敛,即使增加系数个数,计算的精度也不再改变。

4 结论

快速优化设计宽频带天线是天线工程设计中的一个重要课题。本文研究了采用 MBPE 技术对电流展开系数矩阵插值的新方法,仅需天线在少数几个

采样频点上的电流系数矩阵就可以插值生成整个频带内的电流展开系数矩阵,进而很快得到通信天线宽频带内的电特性,大大提高了计算分析过程的速度,对宽频带通信天线的快速分析有着重要的意义。

参考文献

- [1] R F Harrington. Field computation by moment method [M]. New York: Macmillan, 1968.
- [2] 刘其中,宫德明.天线的计算机辅助设计 [M].西安:西安电子科技大学出版社,1988.
- [3] E H Newman. Generation of wide-band data from the method of moments by interpolating the impedance matrix [J]. IEEE Trans. On AP, 1988, 36(12): 1820~1824.
- [4] K L Virga and Y R Samii. Efficient wide-band evaluation of mobile communication antennas using [Z] or [Y] matrix interpolation with the method of moments [J]. IEEE Trans. On AP, 1999, 47(1): 65~76.
- [5] E K Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetics Part I. background and theoretical development [J]. IEEE AP magazine, 1998, 40(1): 42~52.
- [6] E K Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetics Part II. Applications to EM observables [J]. IEEE AP magazine, 1998, 40(2): 51~65.
- [7] E K Miller. Model-based parameter estimation in electromagnetics Part III. Applications to EM integral equations [J]. IEEE AP magazine, 1998, 40(3): 49~66.
- [8] D H Wener and R J Allard. The simultaneous interpolation of antenna radiation patterns in both the spacial and frequency domains using model-based parameter estimation [J]. IEEE Trans. On AP, 2000, 48(3): 383~391.

- [9] S V Polstyanko, R Dyczij-Edlinger, and J F Lee. Fast frequency sweep technique for the efficient analysis of dielectric wave-guides [J]. IEEE Trans On MTT, 1997, 45(6): 1118~1126.
- [10] Y E Erdemli, J Gong, C J Reddy, and J L Volakis. Fast RCS pattern fill using AWE technique [J]. IEEE Trans On AP, 1998, 46(11): 1752~1753.

贺秀莲 (1977-),女,河



南人,西安电子科技大学天线与电磁散射研究所硕士研究生,主要研究方向为电磁散射以及天线 RCS 减缩研究。

龚书喜 (1957-),男,河



北人,现为西安电子科技大学电子工程学院教授,天线与电磁散射研究所所长,天线与微波技术国防重点实验室副主任,西安分部主任,主要研究方向为天线与电磁理论等。

纪奕才 (1974-),男,山



东人,西安电子科技大学天线与电磁散射研究所博士研究生,主要研究方向为天线数值计算和电磁兼容等。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>