

对数周期偶极子天线的建模与仿真

张海祥^{1,2}

(1. 中国人民解放军 63880 部队, 河南 洛阳 471003;

2. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要 矩量法结合等效电路法分析 LPDA 是 D. H. Sinnott 于上个世纪 70 年代首次提出的。到目前为止, 众多的文献资料及文章在分析 LPDA 大多采用此分析方法, 只是模型实现上的细节不同。采用 D. H. Sinnott 和 R. L. Carrel 建模思路建立 LPDA 的增益求解模型, 仿真结果与现有的标准 LPDA 的增益值有较好的一致性。

关键词 LPDA; 矩量法; R. L. Carrel 等效法; 方向图

中图分类号 TN821.6

文献标识码 A

文章编号 1003-3106(2009)10-0042-03

Modeling and Simulation of Log-periodic Dipole Antenna

ZHANG Hai-xiang^{1,2}

(1. The Unit 63880 of PLA, Luoyang Hen'an 471003, China;

2. Ordnance Engineering College, PLA, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract The method of moments combined with equivalent circuit method for analyzing LPDA is put forward firstly by D. H. Sinnott in the seventies of the last century. Since then, the method is mostly used to analyze LPDA in many literature, materials and articles. There exists difference only in the details of model realization. In this paper, the modeling thought of D. H. Sinnott and R. L. Carrel is adopted in establishing the gain solving model of LPDA. The simulation result is well consistent to the current standardized LPDA gain value.

Key words LPDA; method of moments; R. L. Carrel equivalent method; pattern

0 引言

对数周期偶极子天线是极宽频带天线中的一类, 这种天线在短波、超短波、微波等波段的通信、测向、电子对抗等方面具有广泛应用。对于 LPDA 的理论分析历史上有多种方法, 比较典型且目前仍为后人所沿用的有 2 种方法: ① R. L. Carrel 的等效传输线理论分析法; ② D. H. Sinnott 的 LPDA 矩量法结合等效电路理论分析法^[1]。本文利用第 1 种方法的思路, 即用内外问题的求解方法, 在内问题的求解中利用第 2 种方法中的矩量法, 并根据 2 个网络问题的联系求出 LPDA 的电流分布, 外问题求解依据电场辐射叠加原理建立计算 LPDA 增益方向图。代入标准 LPDA 的物理参数后, 模型计算结果与标准的 LPDA 增益值有较好的一致性。

1 LPDA 增益建模

天线的增益求解一般分 2 个步骤: ① 求解天线的电流分布; ② 求解其增益。对于 LPDA 的增益建

模方法, 一般也采用 2 步求解, 即内问题的求解和外问题的求解, 内问题求出 LPDA 的电流分布, 外问题利用求解出的电流分布建立 LPDA 的增益计算模型。

1.1 LPDA 内问题的电流分布求解

LPDA 的内问题的电流分布求解主要是把 LPDA 天线分为 2 个网络的并联, 即天线阵网络和集合线网络, 矩量法分析天线阵网络建立起各振子分段上的电压电流分布, 集合线网络利用传输线网络方法求解, 然后利用 2 个网络的联系及定义压缩扩展矩阵求出 LPDA 的各中心振子上的电流分布 LPDA 的结构如图 1 所示。

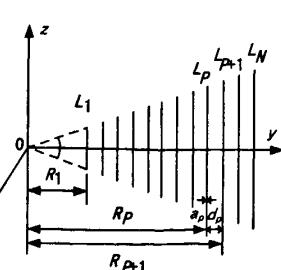


图 1 LPDA 结构

收稿日期: 2005-07-06

1.2 矩量法分析天线阵网络

用矩量法分析天线阵网络的主要目的是建立起 LPDA 各振子分段上的电压电流分布, 所以基函数和检验函数均要选择分段正弦函数, 对于图 1 所示的 LPDA, 设第 P 根振子上的电流分布为^[2]:

$$I_p(z) = \sum_{n=1}^N I_{p,n} S_{p,n}(z)。 \quad (1)$$

式中, $S_{p,n}(z)$ 为分段正弦基函数。

$$S_{p,n}(z) = \begin{cases} \frac{\sin k_0(h_p - |z - z_n|)}{\sin k_0 h_p}, & z_{n-1} \leq z \leq z_{n+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}。 \quad (2)$$

对于自由空间的 LPDA, 振子表面散射电场的切线分量为:

$$\begin{aligned} E_z^i &= \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 \right) \\ &\int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} I(z') G(z, z') dz'。 \end{aligned} \quad (3)$$

在第 q 根振子表面满足关系:

$$E_z^i = -E_z^i。 \quad (4)$$

采用伽略金法取检验函数 $W_{q,m}(z) = S_{q,m}(z)$, 对式(4)取内积得:

$$\sum_{p=1}^N \sum_{n=1}^N I_{p,n} Z_{mn}^{pq} = V_{q,m}。 \quad (5)$$

式中,

$$Z_{mn}^{pq} = -\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{z_{m-1}}^{z_{m+1}} S_{q,m}(z) E_{p,n}(x_q, y_q, z) dz。 \quad (6)$$

Z_{mn}^{pq} 即为广义阻抗的表达式, 对 N 个对称振子共分成 NN 段, 每个振子分成奇数段。则式(5)可写为:

$$U_M = Z_M I_M。 \quad (7)$$

式中, U_M , I_M 分别为 $N \times N$ 维电压列向量和电流列向量; Z_M 为 $NN \times NN$ 阶广义阻抗矩阵, 其元素可以由式(6)算得。由式(7)可知, 除广义阻抗矩阵为已知外, 电压和电流均为未知, 其求解可利用 2 个网络的联系解出。

1.3 R.L.carrel 法分析集合线网络

利用 R.L.carrel 分析集合线网络的主要目的是建立集合线导纳矩阵, 分析 2 个网络的联系时需要集合线网络的导纳值。

$$Y_I = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & Y_{32} & Y_{33} & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & Y_{(NN-1)} & Y_{NN} \end{bmatrix}。 \quad (8)$$

式中, 对角线上自导纳:

$$Y_{11} = -jY_c \cot(K_0 d_1);$$

$$Y_{22} = -jY_c [\cot(K_0 d_1) + \cot(K_0 d_2)];$$

...

$$Y_{NN} = Y_T - jY_c \cot(K_0 d_{N-1})。$$

非对角线广义互导纳:

$$Y_{12} = Y_{21} = -jY_c \csc(K_0 d_1);$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -jY_c \csc(K_0 d_2);$$

...

$$Y_{(N-1)N} = Y_{N(N-1)} = -jY_c \csc(K_0 d_{N-1})。$$

1.4 LPDA 各振子电流分布的求解

此步骤的主要目的是在前 2 步分析的基础上, 在矩量分段上利用定义的压缩矩阵和扩展矩阵取出 LPDA 各振子的中心电流分布。

矩量法求出的各分段的电压、电流表述为:

$$U_M = [0 \cdots 0 U_{A1} 0 \cdots \cdots 0 U_{AN} 0 \cdots 0]^T。 \quad (9)$$

$$I_M = [I_{M1} \cdots I_{M0_1-1}, I_{A1}, I_{M0_1+1}, \cdots,$$

$$I_{M0_N-1}, I_{AN}, I_{M0_N+1}, \cdots, I_{MN}]^T。 \quad (10)$$

式中, $o_i = [\sum_{k=1}^{i-1} M_k] + \left[\frac{M_i + 1}{2}\right]$, $I_{M0_i} = I_{Ai}$, U_{Ai} , I_{Ai} 分别为 LPDA 第 i 根振子的输入端电压和电流, $i = 1, 2, \cdots, N$ 。

为了求 U_A , I_A , 则定义 2 个矩阵: 压缩矩阵 C 和扩展矩阵 S , 分别为:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & & \cdots & & & & & & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & \\ \cdots & & & & & \cdots & & & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & & 1 & \cdots & \\ & & & & & & & & \cdots \end{bmatrix}_{N \times NN}, \quad (11)$$

$$S = C^T。 \quad (12)$$

由式(9)~(12)得出二者的关系:

$$U_M = SU_A, I_A = CI_M。 \quad (13)$$

根据变换关系可以得到:

$$I_A = CZ_M^{-1}S(Y_I + CZ_M^{-1}S)I。 \quad (14)$$

在式(14)右边各项均可求出, 故可求得 LPDA 的中心电流分布, 有了电流分布就可以进入 LPDA 外问题的求解, 即求解其增益方向图。

1.5 LPDA 外问题的增益模型建立

利用求得 LPDA 的电流分布, 可以求得其方向函数及方向性系数, 进而建立其增益求解模型。对数周期天线在远区的辐射场, 等于所有振子在该点处辐射场的叠加。取坐标如图 2 所示, 天线置于 XZ 平面内, 其几何顶点置于坐标原点。振子的电流被

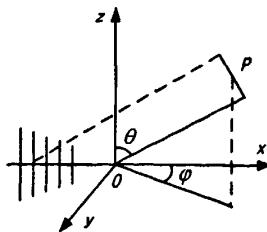


图 2 LPDA 辐射场的坐标

确定以后,就可以计算远区场:

$$E_\theta = j60 \frac{e^{-j\beta_1}}{r_1} \sum_{n=1}^N \frac{I_n [\cos(\beta_n \cos \theta) - \cos \beta_n]}{\sin \theta \sin \beta_n} e^{-j\beta_n \sin \theta \cos \varphi}. \quad (15)$$

式中, θ 从 z 轴量起; φ 从 x 轴量起。

LPDA 在 E 面辐射方向函数为:

$$f_E(\varphi = 0, \theta) = \left| \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^N \frac{I_n [\cos(\beta_n \cos \theta) - \cos \beta_n]}{\sin \beta_n} e^{-j\beta_n \sin \theta} \right|. \quad (16)$$

LPDA 在 E 面的方向性系数为:

$$D = \frac{4\pi F(\theta, \varphi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}. \quad (17)$$

式中, $F(\theta, \varphi)$ 为天线辐射强度函数, $F(\theta, \varphi)|_{\max}$ 为最大辐射强度, 对于自由空间的 LPDA, $F(\theta, \varphi) = |f(\theta, \varphi)|^2$ 。

增益表达式为:

$$G = 10 \lg D \eta. \quad (18)$$

式中, η 为天线效率。

2 LPDA 仿真

模型利用一副标准天线的输入参数及实测值去验证, 输入参数分别为天线工作频段内的各频点、振子数目、最长振子的长度、比例因子、间距因子、特性阻抗和振子半径等参数, 标准 LPDA 的参数为: $N = 31$, $f = 80 \sim 1300$ MHz, $\tau = 0.8926$, $\sigma = 0.0439$, $l_{\max} = 0.98$, $Z_0 = 83 \Omega$, 计算增益如图 3 所示。

(上接第 23 页)

3 结束语

在穿墙条件下, X 波段雷达信号可以检测到人体运动的特征, 穿透性能较好; 基于 Burg 算法检测方法是可行的, 在同等检测时间内, 比 FFT 算法具有更强的检测能力, 为穿墙目标探测提供一种行之有效的方法。

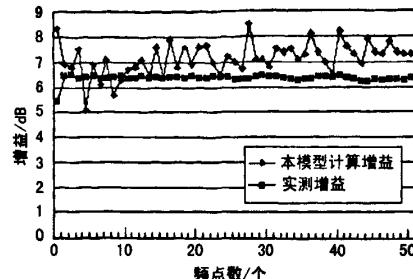


图 3 本模型计算的增益与实测值比较

从图 3 中可以看出, 模型软件计算结果与实测值有较好的一致性。

3 结束语

本文采用 D. H. Sinnott 与 R. L. carrel 的建模思路来建立求解模型, 实际分析中按内外 2 个问题求解, 其中用矩量法分析天线阵网络, 基函数与检验函数选择分段正弦基函数伽略金法, 求解出各分段的电流和电压分布, 利用 2 个网络的联系求得了 LPDA 的电流分布, 进而计算天线的增益方向图, 所建模型计算的增益结果与实际测量值有较好的一致性。模型的精度取决于天线矩量法分段长度的大小, 分段太小精度会提高, 但导致计算量增大, 分段太大计算误差又会很大, 所以, 在实际仿真时, 需要选择合适的分段长度。

参考文献

- [1] SINNOTT D H. Computer Analysis of the Log-periodic Dipole Antenna [C]. Australia: Weapons Res Salisbury SA Australia Tech Note WRE-TN-712 (AP), 1972: 20 - 31.
- [2] 丁晓磊, 王建, 林昌禄. 对数周期偶极天线的一种新的分析方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (5): 16 - 19.
- [3] 谢处方, 邱文杰. 天线理论与设计 [M]. 陕西: 西北电讯工程学院出版社, 1987.

作者简介

张海祥 男, (1979 -), 中国人民解放军 63880 部队在职硕士, 工程师。主要研究方向: 通信对抗。

参考文献

- [1] MISRA K. Scattering of Electromagnetic Waves by Human Body and Its Applications [D]. Michigan Ph. D. dissertation Michigan State University East Lansing 1984.
- [2] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理(第 3 版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
- [3] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

作者简介

张红旗 男, (1971 -), 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师。主要研究方向: 雷达系统和雷达信号处理。

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>