

大张角对数周期天线的宽带特性

刘江宏¹, 周良明², 梁 建²

(1. 西安导航技术研究所 西安 710068 2. 西安电子科技大学 西安 710071)

摘要: 本文采用矩量法分析和计算了对数周期天线在张角较大时, 它的阻抗、电压驻波比、增益及方向图的宽带特性, 讨论了这些特性与天线结构参数之间的关系。根据分析和计算, 设计并制作天线进行实验测试, 理论计算和测试结果表明, 两者吻合较好。

关键词: 矩量法; 对数周期天线; 张角; 宽带特性

中图分类号: TN821.6 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2001)03-0337-04

The Broadband Characters of Large Angle LPDA

LIU Jiang-hong¹, ZHOU Liang-ming², LIANG Jian¹

(1. Xi'an research Institute of Navigation technology, Xi'an 710068, China 2. XIDIAN University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The method of moments is used to analyze and calculate the broadband characters of impedance, voltage standing wave ratio(VSWR), gain and radiation pattern of larger angle LPDA, and the relation between these characters and the parameter of antenna construction is discussed in this paper. Based on analysis and calculation, the antenna is designed and tested, and the measured results are in good agreement with the theoretical calculation.

Key words: the method of moments, LPDA, angle, the broadband characters

1 引言

对数周期天线是超宽频带定向天线, 其结构有多种形式, 常用的典型结构是偶极子构成的对数周期天线, 如图1所示, 这种结构天线称为 LPDA(Log Periodic Dipole Antennas)。众所周知, 这种天线通常都设计在较小的张角, 此时, 它可以在很宽的频带内获得几乎不变的阻抗、方向图和增益值, 具有十分优良的宽带特性。但是小张角天线的纵向尺寸非常大, 往往限制了它的实际应用。

如图1所示, 天线的长度 L 与张角 2α 有下列关系:

$$L = \frac{l_1/2}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (1)$$

式中 L 为天线顶点 0 至最长振子之间的距离, 即天线的纵向长度, l_1 为最长振子的长度, 一般设 $l_1 = 0.5\lambda_{\max}$, λ_{\max} 为最低工作频率的波长。当 $2\alpha = 20^\circ$ 时, $L = 1.42\lambda_{\max}$, 若 $2\alpha = 60^\circ$, 则 $L = 0.43\lambda_{\max}$, 由此可见, 天线张角增大, 天线的纵向尺寸可以大大缩小。然而在大张角情况下, LPDA 的电特性将会是怎样的, 是否仍具有良好的宽带特性? 本文采用矩量法建立 LPDA 的计算软件, 分析计算大张角时 LPDA 的阻抗、驻波、增益及方向图特性, 讨论其宽带特性与天线结构之间的关系, 并给出了计算实例和实验数据。

2 天线结构、原理及计算

如图1所示, LPDA 是由 N 个平行偶极子按一定比例关

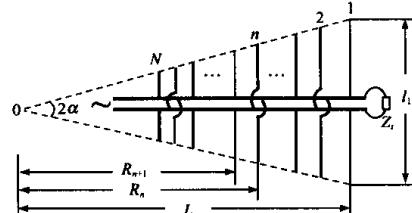


图1 LPDA 的结构示意图

系排列而成, 它连接在一对双线传输线上, 称为集合线, 馈源接在短振子的集合线一端, 相邻两振子交叉馈电, 与长振子相接的集合线终端有时接一阻抗元件或支节, 用以减小终端的反射, 改善天线在低频端的驻波特性。天线的结构参数如下定义:

$$\begin{aligned} \text{周期率或比例因子: } \tau &= l_{n+1}/l_n = R_{n+1}/R_n = d_{n+1}/d_n \\ \text{张角或结构角: } 2\alpha &= 2\operatorname{arc} \operatorname{tg}(l_n/2)/R_n \\ \text{间隔因子: } \sigma &= d_n/(2l_n) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 l_n 是第 n 个振子的长度, R_n 是第 n 振子到天线顶点 0 的距离, d_n 是第 n 个振子与第 $n-1$ 个振子的间距。根据天线结构的几何关系有:

$$\alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg}(1 - \tau)/4\sigma \quad (3)$$

因此, 参数 τ, α, σ 仅有两个是独立的。

这种天线馈电后,电磁能量沿集合线仅对接近于谐振长度的部分振子激励,形成天线的辐射。这部分被激励的振子称为有效区,天线的特性主要取决于有效区。随着频率的变化,有效区随之移动。由于天线具有“相似”原理的结构,当天线按一定的比例因子 τ 变换后,仍为它原来的结构,这样,天线的有效区基本保持不变,使出现在频率 f 与 τf 之间的电特性在 τf 与 $\tau^2 f$ 之间重复出现。因而,天线的电特性将在很宽的频带内作周期性的变化。

根据 LPDA 的结构,它可以等效为两个网络,其电流、电压和阻抗之间的关系分别由两个矩阵方程表示^[1]。一是耦合振子网络方程:

$$[U_A] = [Z_A] \llbracket I_A] \quad (4)$$

另一是集合线网络方程

$$[I_l] = [Y_l] \llbracket U_l] \quad (5)$$

式中 $[U_A] = [U_l]$ 为各振子端口的电压矩阵, $[I_A]$ 为流经振子的各端口电流, $[I_l]$ 为流经集合线的各端口电流, 则各端的电流矩阵

$$[I_s] = [I_A] + [I_l] = ([I] + [Y_l] \llbracket Z_A]) \llbracket I_A] \quad (6)$$

$$[I_A] = [T]^{-1} [I_s] \quad (7)$$

式中

$$[T] = [I] + [Y_l] \llbracket Z_A] \quad (8)$$

$[I]$ 为单位矩阵,由于 LPDA 仅在端口 N 处提供激励源,并设该源为单位电流,则有

$$[I_s] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$[Y_l]$ 为集合线导纳矩阵,可由传输线理论求得。

$[Z_A]$ 由振子的自阻抗和互阻抗构成,它可由感应电动势法或矩量法求得。本文采用矩量法-脉冲基点选配建立 LPDA 的计算软件^[2],首先用来验算典型的 LPDA 的特性,其参数为 $\tau = 0.917$ 、 $\sigma = 0.169$ 、 $2\alpha = 14^\circ$ 、振子数目 $N = 18$ 、工作频带为 $200 \sim 600$ MHz, 集合线特性阻抗 $Z_c = 83\Omega$, 终端阻抗 $Z_t = 83\Omega$, 第一个振子长度 $l_1 = 0.75$ m, 设振子的半径 $\alpha = 0.001\lambda$ 。阻抗和增益的计算数据和文献^[1]给出的数据进行比较如表 1 和表 2 所示,两者非常接近,同时也对 E 面和 H 面方向图进行比较,两者也非常一致,由此可见计算软件具有较高的精度。

表 1 输入阻抗比较表

频率(MHz)	150	200	300	450	600	650
文献值(Ω)	$89 + j20.0$	$69 - j7$	$72 - j4$	$76 - j6$	$78 - j11$	$71 - j27$
计算值(Ω)	$88.5 + j17.9$	$67.4 - j7.5$	$70.6 - j4.2$	$74.8 - j8.4$	$78.6 - j10.8$	$72.9 - j27.9$

表 2 增益值比较表

频率(MHz)	150	200	300	450	600	650
文献值(dB)	5.54	8.75	9.43	9.51	9.37	8.98
计算值(dB)	5.67	8.97	9.53	9.70	9.44	8.87

3 大张角 LPDA 的宽带特性

3.1 张角对天线电特性的影响

表 3 给出了 $\tau = 0.84$ 、 $Z_c = 60\Omega$ 、 $Z_t = 50\Omega$ 、 $N = 13$ 、 $2\alpha = 30^\circ$ 和 50° 时, 在频带 $100 \sim 700$ MHz 范围内 LPDA 的输入阻抗 Z_{in} 、电压驻波比 VSWR 和增益 G 的计算数据, 图 2 和图 3 给出了它们的 E 面方向图。由这些数据和方向图不难看出:

(1) 随张角的增大, VSWR 值略有增大, 但在频带内 VSWR ≤ 2.0 。

(2) 在张角较小时, 增益值较大, 且在频带内起伏变化较小, 当张角变大时, 增益值减小, 且起伏变化较大。

(3) 当张角变大时, 方向图主瓣出现分裂, 使轴向增益显著下降。

表 3 不同张角时的天线特性

频率 MHz	$2\alpha = 30^\circ$			$2\alpha = 50^\circ$		
	Z_{in}	VSWR	G	Z_{in}	VSWR	G
100	$40.3 - j6.5$	1.3	5.76	$38.5 + j3.8$	1.32	5.30
200	$50.9 - j0.7$	1.02	8.79	$54.6 + j0.5$	1.09	6.81
300	$41.6 - j1.9$	1.21	8.81	$49.7 - j4.8$	1.1	4.61
400	$63.3 + j2.8$	1.27	7.35	$44.4 + j5.0$	1.17	7.34
500	$73.7 + j1.8$	1.48	8.38	$48.3 + j5.6$	1.13	3.98
600	$45.3 + j1.3$	1.11	8.04	$44.8 - j2.9$	1.13	4.30
700	$34.4 - j7.6$	1.51	7.34	$31.9 - j11.0$	1.69	1.97

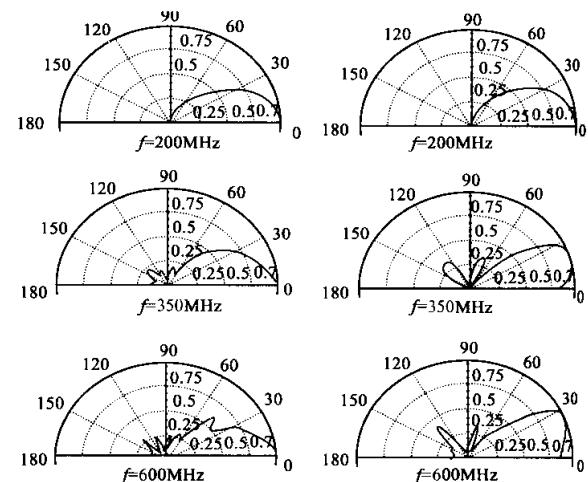


图 2 $2\alpha = 30^\circ$ E 面方向图

3.2 周期率对天线电特性的影响

现在分析计算张角较大时, τ 值变化对天线特性的影响。设 $2\alpha = 60^\circ$ 、 $\tau = 0.82$ 、 0.84 和 0.86 , 其它参数为 $Z_c = 90\Omega$ 、 $Z_t = 50\Omega$ 、 $N = 17$ 。表 4 给出了在频带 $100 \sim 1000$ MHz 范围内的输入阻抗、驻波和增益值,由此可见:

(1) 在张角一定时, τ 有一最佳值, τ 值太大和太小都会使天线轴向增益值显著下降,这是因为天线主瓣发生分裂。

(2) τ 值变化对驻波值略有影响,但在频带内都可以满足

$VSWR \leq 2.0$ 。当 $\tau = 0.86$ 时,在高端的 $VSWR > 2.0$,且增益值较低。这是因为 $N = 17$ 不能满足频带的要求,需要适当增加振子数目。

表 4 不同 τ 值时的天线特性

频率(MHz)	$\tau = 0.82$			$\tau = 0.84$			$\tau = 0.86$		
	Z_{in}	VSWR	G	Z_{in}	VSWR	G	Z_{in}	VSWR	G
100	$45.1 - j11.1$	1.29	4.73	$46.2 + j3.4$	1.11	5.02	$42.2 + j6.8$	1.25	5.34
200	$38.5 - j4.7$	1.33	5.12	$70.8 - j23.7$	1.69	7.29	$51.4 + j13.4$	1.3	6.01
300	$41.7 - j7.5$	1.27	5.19	$47.4 - j26.7$	1.72	6.97	$49.8 - j27.4$	1.72	5.12
400	$90.9 + j5.4$	1.83	6.59	$82.2 + j15.6$	1.74	7.69	$87.2 - j21.9$	1.9	4.56
500	$101.1 + j2.4$	2.02	5.43	$89.5 - j18.2$	1.89	7.73	$40.6 - j5.8$	1.20	5.39
600	$74.2 + j28.7$	1.83	5.44	$86.5 - j10.5$	1.77	7.66	$40.7 + j0.5$	1.23	5.30
700	$45.6 + j2.6$	1.11	5.47	$76.9 + j19.6$	1.70	8.64	$37.7 - j5.7$	1.37	4.71
800	$69.1 - j30.2$	1.82	4.26	$44.7 - j3.7$	1.15	7.92	$57.1 - j35.1$	1.93	5.08
900	$60.9 + j23.1$	1.58	5.71	$74.1 - j25.5$	1.76	5.51	$78.5 - j1.3$	1.57	4.44
1000	$67.6 - j35.0$	1.94	4.31	$49.8 + j17.5$	1.42	8.05	$18.5 - j9.7$	2.82	1.94

3.3 其它结构参数对天线电特性的影响

(1) 在小张角时,一般最长振子取 $l_1 = \lambda_{max}/2$,但在大张角时,从表 4 可以看出,100MHz 的增益值都比较低,这是因为大张角时 100MHz 的有效区振子数与中间频率的振子数有较大差别。只要适当增加 l_1 长度就可以提高低频的增益值,使频带内的特性较为均匀。

(2) 振子数 N 主要与频带宽度有关,频带宽,要求振子数目多。在满足同样的工作频带情况下,大张角时振子数 N 较少。

(3) Z_c 与 Z_t 主要影响阻抗匹配,当馈线采用 50Ω 的电缆时, Z_c 一般设计在 $50 \sim 100\Omega$ 之间,适当调整 Z_c 值,可以改善频段内的驻波特性。 Z_t 主要改善低端的驻波特性,有些情况下可使 $Z_t = 0$ 或 ∞ 。

3.4 计算实例和实验测试

根据上述计算和分析,设 $\tau = 0.875$,频带为 100 ~ 1000MHz 取 $l_1 = 1.66\text{m}$, $N = 20$, $Z_c = Z_t = 70\Omega$,分别计算张角 $2\alpha = 60$ 度、62 度和 64 度的驻波和增益值,也计算 E 和 H 面方向图,同时也分析计算了一个 τ 周期内若干频率的驻波和增益特性,当 $2\alpha = 60$ 度和 62 度时,在某些频率上方向图主瓣出现分裂。

(3) τ 值取较大时,可使天线增益增大,但必须适当调整张角或者设计最佳的 σ 值,保证在频带内的方向图主瓣不发生分裂。

当 $2\alpha = 64$ 度时,在频带内主瓣基本上没有分裂,因而设计制作了 $2\alpha = 64$ 度的 LPDA,并进行了实验测试。

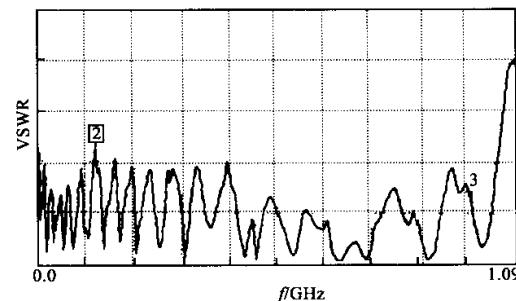


图 4 驻波测试值

电压驻波比测试曲线如图 4 所示,在 100 ~ 1000MHz 范围内,驻波值随频率做周期性起伏变化,在频带内实测值和计算值 $VSWR \leq 2.0$,但数值上有差别,这是因为天线结构尺寸和环境条件的微小影响都将会使数值发生变化。

三个频率的方向图测试值和计算值如图 5 所示,由于 200MHz 附近有干扰,故测试频率改为 220MHz。由图可见,方向图主瓣吻合得很好,副瓣电平数值有差别,但其变化规律

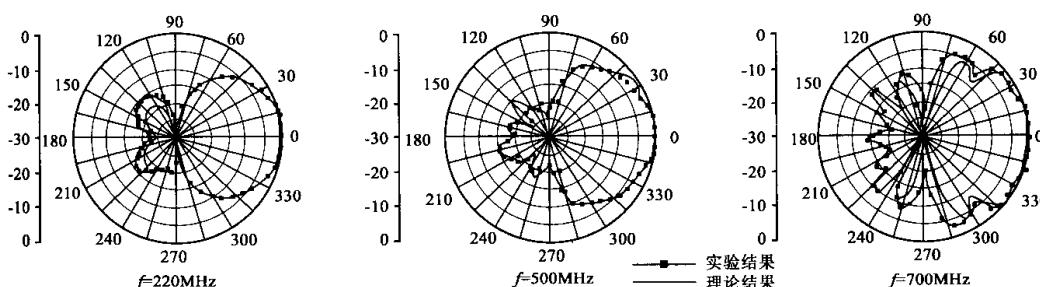


图 5 E 面方向图的计算和测试结果

十分相似,这是由于副瓣测试电平很低,干扰噪声和测试环境的影响,使得副瓣电平值出现较大的差别,甚至产生不对称图形。

增益值如表 5 所列,计算值和测试值比较接近,但测试值略偏高,这是由于标准天线(半波对称振子)连接宽频带平衡-不平衡变换器,其磁芯存在一定的损耗,使得测试值偏高。

4 结论

分析计算表明,大张角 LPDA 仍具有良好的宽带特性,当张角增大时,天线的纵向尺寸可以大大缩小,这在天线尺寸受到限制情况下,具有重要的实用意义.显然,缩小天线的尺寸,必然要以牺牲天线增益或带宽为代价,因此大张角 LPDA 与小张角相比,其增益有所降低,在频带内性能起伏变化增大.

表 5 增益值比较表

频率(MHz)	100	200	300	400	500	600	700
测试值(dB)	7.55	7.45	8.95	8.55	8.85	8.65	7.15
计算值(dB)	6.86	6.82	7.71	8.52	7.90	8.36	6.51

在大张角情况下,天线的驻波宽带特性容易满足,但方向图的主瓣往往出现分裂,必须选择合适的结构参数,保证 E 面和 H 面的主瓣不发生分裂,使得工作频带内具有较为均匀的增益值,或者方向图的波瓣变化较小.当 τ 值一定时,有最佳张角 2α 或最佳间隔因子 σ 值,此时可使方向图不发生分裂,在频带内获得较为均匀的电特性.

参考文献:

[1] 周朝栋等著.线天线理论与工程[M].西安电子科技大学出版社,1988 年

[2] 梁建.高斯曲线振子 LPDA 的特性分析与计算[D].西安电子科技大学硕士论文 1996 年

[3] 王元坤等著.线天线的宽频带技术[M].西安电子科技大学出版社,1995 年

[4] 魏文元等著.天线原理[M].国防工业出版社,1985 年

[5] R. F. Harrington. Field Computation by Moment Methods[M], New York, MacMillan, 1968

[6] W. L. Stutzman and G. A. Thiele. Antenna theory and Design[M]. John Wiley and Sons, Inc. 1981

作者简介:

刘江宏 1964 年生,山西临猗人,1986 年毕业于西北电讯工程学院电磁场工程专业.中国电子学会青年工作委员会委员,高级会员,高级工程师.主要从事线天线、组合天线、抗干扰天线等技术研究.已在学术刊物和学术会议上发表论文 4 篇.

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>