

文章编号:1000-582X(2008)07-0775-06

## 不同夹角 V 型蝶形天线性能比较

李长勇<sup>1,2</sup>, 杨士中<sup>1</sup>, 曹海林<sup>1</sup>, 张承畅<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030; 2. 中国人民解放军重庆通信学院, 重庆 400035)

**摘要:**采用基于 RWG(Rao Wilton Glisson)边元建模、RWG 基函数的矩量法求解蝶形天线表面电流,得到天线的性能参数,比较分析了天线两臂夹角分别在 30°、45°、60°、90°、180°(平面结构)时,频带在 25 MHz~4 GHz 内天线的输入阻抗、反射系数、增益、辐射功率及方向性。分析可知:夹角越小,频带辐射功率越大,高频比低频更能有效辐射,方向性略有增强;平面结构天线性能参数在频带内变化更平稳,更有利于低频带的辐射。

**关键词:**RWG 边元;矩量法;输入阻抗;反射系数;天线增益;辐射功率;方向性

中图分类号:TN820

文献标志码:A

### A performance comparison of V-shaped bow-tie antennae

LI Chang-yong<sup>1,2</sup>, YANG Shi-zhong<sup>1</sup>, CAO Hai-lin<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-chang<sup>1</sup>

(1. College of Communication Engineering of Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;  
2. College of Chongqing Communication of P. L. A., Chongqing 400035, P. R. China)

**Abstract:** The surfaces current of V-shaped bow-tie antennae were solved using method of moment employing the Rao Wilton Glisson (RWG) base function. The performance parameters of antennas subsequently were found. In the band 25 MHz-4 GHz, the input impedance, reflection coefficient, antenna gain, radiated power, and directivity of V-shaped antennae with angles of 30°, 45°, 60°, 90°, and 180° were compared and analyzed. The results indicate that the smaller the angle of antennas is, the greater the radiated power is. High frequency power is radiated more effectively than low frequency power. The directivity of antennas strengthens as the angle decreases. The parameters of planar bow-tie antennae change smoothly which is advantageous for radiation in low frequency bands.

**Key words:** Rao Wilton Glisson edge element; method of moment, input impedance; reflection coefficient; antenna gain; radiated power; directivity

求解理想导电目标表面的未知电流时,可以采用平面三角形单元对导体表面进行拟合,建立 RWG(Rao Wilton Glisson)边元模型和基函数<sup>[1-3]</sup>,再利用矩量法(MOM)求解电场或磁场积分方程中的未知电流分布。RWG 模型中相邻两三角形构成 RWG 边元,这种方法物理上可理解为:边元的表面电流可用具有等效偶极子或强度为无穷小的短偶极子代替<sup>[4]</sup>,整个天线表面就

可以看成是所有等效的无穷小短偶极子构成,每一个无穷小的短偶极子的辐射场可以由经典的解析式表示,总的辐射场是所有这些无穷小偶极子贡献之和。等效偶极子的辐射场相互作用产生电流效应,这可用阻抗矩阵表示,这个矩阵就是矩量方程中的系数矩阵。矩阵的每一元素可以通过基函数进行积分计算得出,在已知天线激励时,可得到天线表面电流。

收稿日期:2008-03-26

基金项目:重庆市院士基金资助项目(CSTC:2008BC2001);重庆大学研究生科技创新基金资助项目(200801A1A0150274)

作者简介:李长勇(1971-),男,重庆大学博士研究生,主要从事超宽带通信及超宽带天线技术方向研究。

杨士中(联系人),男,中国工程院院士,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)ysz@ccee.cqu.edu.cn。

平面蝴蝶结天线具有很宽的频带,适合脉冲信号的辐射,特别是在探地雷达系统中有很好的应用<sup>[5-7]</sup>。有不少学者对其研究,文献[8-9]采用时域有限差分(FDTD)方法研究了阻性加载对平面蝴蝶结天线的性能的影响,加载改善了脉冲的反射特性。文献[10]研究了采用印制板平行带线馈电的印制蝴蝶结天线,其带宽可达 50%,文献[11]基于 ADS 矩量仿真工具分析了实板金属材料以及细带和三角网金属材料结构的平面蝴蝶结天线的宽带特性。文献[12]采用基于 RWG 基函数的矩量法分析了加载平面蝴蝶结天线特性,分析可知加载抑制了辐射波形的拖尾。文献[13]采用基于 RWG 基函数的矩量法对平面蝴蝶结天线进行了仿真分析,给出了其输入阻抗、增益、辐射功率、方向性等性能。这些研究都是基于平面结构天线,对于 V 型结构的天线,文献[14]研究了线形振子折成 V 型时的脉冲辐射的结构优化,给出了一个最佳夹角。对 V 型蝴蝶结天线参数变化的研究还未见报道。笔者在此基础上基于 RWG 基函数的矩量法分析比较了几种夹角的 V 型蝴蝶结天线在宽频带内的性能,对工程设计有一定的参考价值。

## 1 RWG 基函数及矩量法

天线导体表面用平面三角形进行拟合,每相邻两三角( $T^+$ 和 $T^-$ )构成一边元模型,这两三角形不一定在同一平面,其公共边为 $l$ ,如图 1。

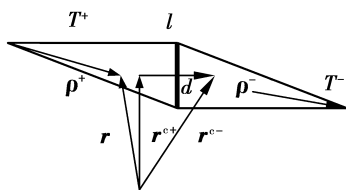


图 1 RWG 边元(相邻两三角形)

RWG 矢量基函数<sup>[1-2]</sup>为

$$f(r) = \begin{cases} (l/2A^+) \rho^+(r), & r \text{ 在 } T^+ \text{ 内,} \\ (l/2A^-) \rho^-(r), & r \text{ 在 } T^- \text{ 内,} \\ 0, & r \text{ 在其他.} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $l$ 是边元的长度(两三角形公共边的长度); $A^\pm$ 是三角形 $T^\pm$ 的面积;矢量 $\rho^\pm$ 如图所示,矢量 $\rho^+$ 是从三角形的自由顶点指向观察点 $r$ ,矢量 $\rho^-$ 是从观察点 $r$ 指向三角形的自由顶点。边元的基函数近似相应于长度 $d = |r^{c+} - r^{c-}|$ 的有限电偶极子,上标 $c$ 表示三角形的中心。

天线表面 $S$ 电流密度 $J$ (矢量)分布是天线在受到激励后要求解的未知量,矩量法求解时,它可表示

为一系列基函数的组合,也说明它为所有边元贡献之和,这里表示成天线所有 $M$ 个边元的基函数方程扩展形式:

$$J = \sum_{m=1}^M I_m f_m, \quad f_m = \begin{cases} (l_m/2A_m^+) \rho_m^+(r), & r \text{ 在 } T_m^+ \text{ 内,} \\ (l_m/2A_m^-) \rho_m^-(r), & r \text{ 在 } T_m^- \text{ 内,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

如果 $S$ 是开面, $J$ 视为 $S$ 的 2 个对应面的表面电流的矢量和, $J$ 的单位是 A/m。由于基函数在每一边元内分别有值并且在天线三角网格化后为已知,所以矩量法目的是求解扩展系数(权) $I_m$ 构成的矢量 $I$ ,由电场积分方程用伽略金法进行检验后得到矩阵方程

$$[Z_{mm}][I_m] = [V_m], \quad (3)$$

式中的 $[V_m]$ 构成天线的电压激励列向量,向量长为 $M$ 。向量的每个元素对应每个边元的激励电压,对接收天线,它为空间入射电场在天线上感应的电压;对发射天线,只有在天线馈电处的边元上有激励电压,这时,馈电模型用 $\delta$ 函数发生器法或边馈电模型法<sup>[15]</sup>。除这个边元以外的其他边元,没有激励电压。

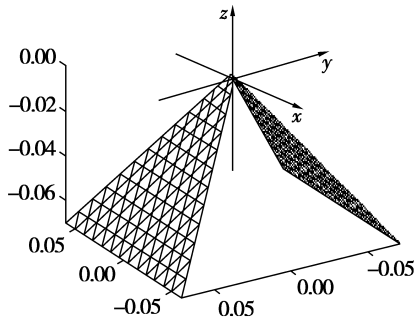
方程(3)中的 $[Z_{mm}]$ 为不同边元之间相互作用的阻抗矩阵。 $Z_{mm}$ 可以由电场积分方程求解出来<sup>[1]</sup>,在计算时,涉及到被积函数的奇异性处理,可采用坐标变换技术<sup>[1,16]</sup>。由于每一边元等效为一小偶极子, $Z_{mm}$ 表示等效偶极子 $n$ 通过辐射场对等效偶极子 $m$ 的电流贡献, $Z_{mm}$ 反过来表示等效偶极子 $m$ 通过辐射场对等效偶极子 $n$ 的电流贡献。这种贡献可以解析计算或应用电场积分方程求解, $Z_{mm}$ 的解析式可以参考文献[1]。

由式(3)求出 $I$ 后,可得天线的表面电流,每一边元等效为一强度是 $l_m I_m$ 、有效长度 $d = |r^{c+} - r^{c-}|$ 的偶极子<sup>[15]</sup>,小偶极子的辐射场可由经典的解析式表示<sup>[17]</sup>,从而可得自由空间的总电磁辐射。进一步可以得到输入阻抗、增益、辐射功率、方向性。

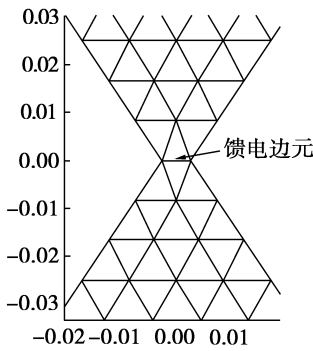
对发射天线,馈电电压为已知量,在求得馈电处的电流后可以得到天线的输入阻抗。

## 2 V 型蝴蝶结天线的三角网格化

蝴蝶结天线平面状态下长 20 cm,馈电边元长 0.5 cm,张角 $\alpha = 60^\circ$ ,平面三角天线折成 V 型,由于形状比较规则,采用解析法编程进行三角形网格分解,然后利用 Matlab 函数 delaunay3 对此结构进行德洛内三角化。图 2 给出了天线网格化模型。网格大小(三角形高)为天线长的 1/24,这样可得到近 500 个边元,对生成更小的网格的分析结果比较后可知,该网格大小已有很好的精度。



(a) V 型蝶形天线三角网格图( $\alpha=60^\circ, \theta=60^\circ$ )



(b) 馈电模型

图 2 天线三角网格化模型

### 3 V 型蝴蝶结天线特性仿真分析

利用前面建模和分析方法,用 Matlab 编程进行数值计算。天线的三角面张角  $\alpha=60^\circ$ 、天线长度  $L=20\text{ cm}$  时,在天线两臂夹角为  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  (平面结构) 时,分别计算在馈电电压幅值为  $1\text{ V}$ , 频率从  $25\text{ MHz}\sim 4\text{ GHz}$ , 频率间隔为  $25\text{ MHz}$ , 共 160 个频点时的阻抗矩阵, 并求解矩阵方程, 分别得到 5 种夹角下的天线输入电阻、电抗、反射系数、增益、辐射功率和辐射方向性, 对这些参数进行了比较分析。

#### 3.1 输入阻抗与反射系数

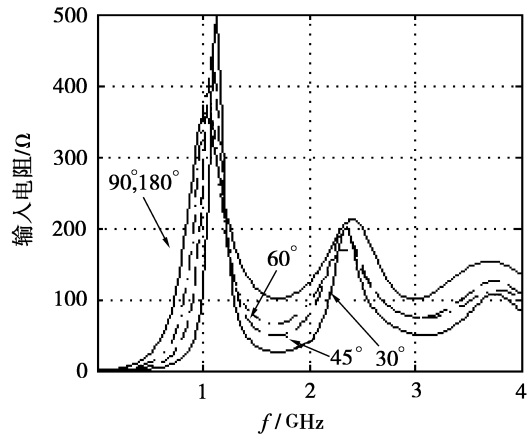
在 5 种夹角下, 输入电阻和电抗的变化规律基本一致, 馈电电压的频率增加时, 蝴蝶结天线的输入阻抗会发生一定的振荡, 且在  $1\text{ GHz}$  左右出现峰值, 如图 3。但与文献[13]中的偶极子天线的仿真结果相比, 阻抗特性曲线的振荡要小得多, 在  $0\sim 4\text{ GHz}$  的分析频带内, 振荡的次数和极大值发生的频点与天线的电长度有关。夹角越大, 输入电阻也越大(除峰值处)且振荡幅度越小, 说明输入电阻随频率变化相对平稳, 如图 3(a), 输入电抗的变化与输入电阻变化类似, 如图 3(b)。

通过对平面结构, 张角为  $\alpha=60^\circ$  时, 4 种长度  $10, 20, 40, 80\text{ cm}$  蝴蝶结天线的输入阻抗的曲线比

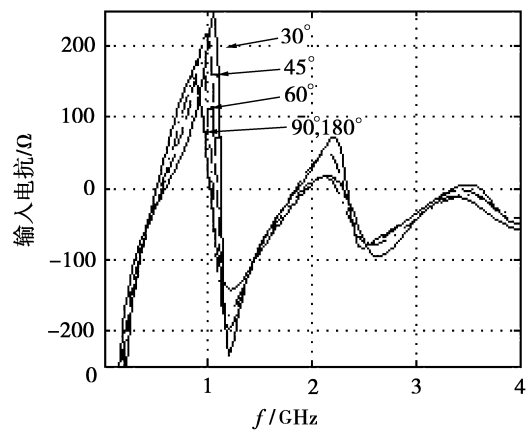
较可知, 不同长度的天线的输入阻抗曲线只是在横坐标上的伸缩关系, 这种关系在反射系数、增益、辐射功率的曲线上也同样存在。天线长度越长, 输入阻抗小幅振荡的频带越宽, 低反射系数对应的频带越宽, 也就是越向低频扩展, 越有利于低频的辐射。

图 4 中, 在观测的频带内, 反射系数曲线有几个谷值, 也就是说在几个频点处有更小的反射系数。平面结构天线的反射系数的最小值出现在一低的频率处(第一个极小值), 而有夹角的天线的反射系数最小值出现在中间频率处, 夹角越小, 该频率越大, 这说明小夹角对高频率的辐射能力强。

$\theta=90^\circ$  与  $\theta=180^\circ$  2 种情况的输入阻抗与反射系数曲线几乎完全重合, 且在这之间的其它角也重合, 这说明, 夹角  $\theta$  张大到一定的数值( $90^\circ$ ) 时对输入阻抗的影响不大。



(a) 实部(输入电阻)



(b) 虚部(输入电抗)

图 3 天线输入阻抗曲线

#### 3.2 辐射功率和增益

天线辐射功率是在天线馈电信号的幅度为  $1\text{ V}$  时的辐射功率, 曲线变化规律与文献[13]给出的一致, 但夹角越大, 整个频段内的辐射功率越小, 在频带

内可以识别出一个很强的功率辐射点,频率增加时,在另外的频点表现出适当的增强。图 5 给出了这个强辐射点附近的曲线,夹角越小,这个功率点的值越大,所在的频点也有所增大,夹角  $\theta=30^\circ$ , 600 MHz 时可达 80 mW 以上的高输出功率。强辐射点也与天线的电长度有关,对 4 种长度的分析可知,对应天线  $L$  为 10、20、40、80 cm 时对应的谐振频点为 0.8、0.4、0.2、0.1 GHz。天线的长度/波长比值具有略大于 1:4 的关系。图 5 也说明夹角越大时,辐射频带向低频扩展,这对低频信号强的脉冲辐射有利。

如图 6 所示,增益为方向性的最大值,在整个频带内,平面天线的增益相对平稳(1.8~5.0 dB),在低频带(1.5 GHz 以下)比有夹角的天线增益高;而有夹角的天线的增益在整个频带内变化范围更大(0.5~9.0 dB)。

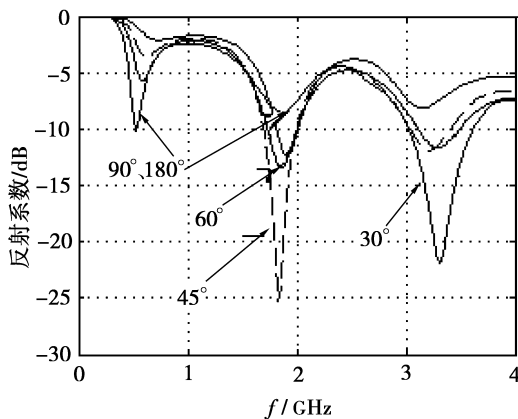


图 4 不同夹角天线的反射系数

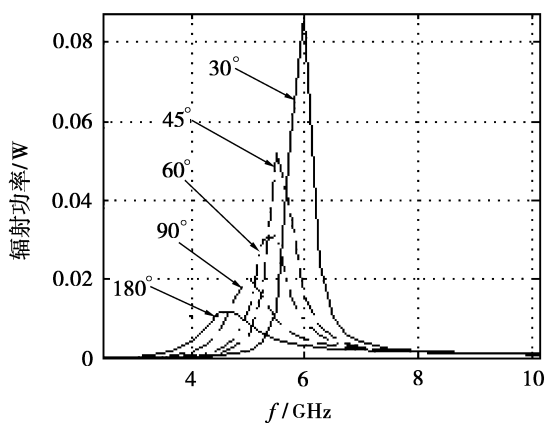


图 5 不同夹角天线的辐射功率

### 3.3 方向性

图 7 给出了不同夹角、不同频率时的方向图比较。

在  $XZ$  平面内,在低频时(小于 1 GHz),有夹角的天线与平面天线的方向图均为全向的。但随着频率

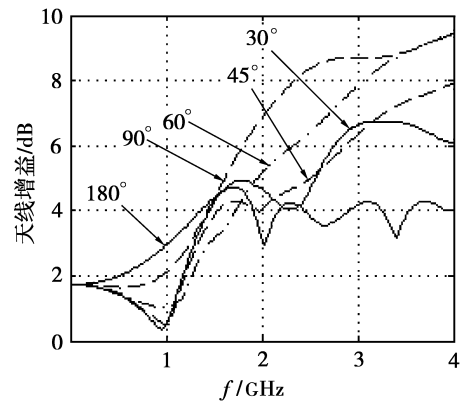
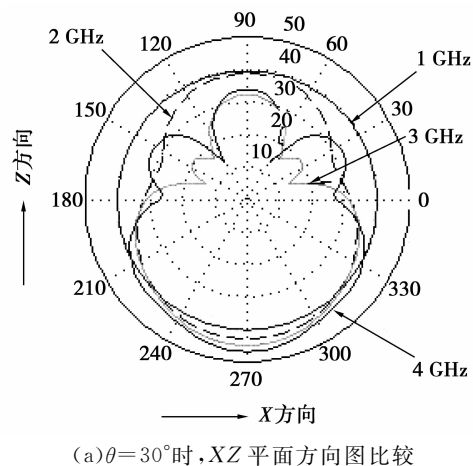


图 6 不同夹角天线的增益

的增大,到一定的临界值时,天线开始表现出方向性,这个临界值频率随天线的夹角  $\theta$  增大而有一定的增大( $\theta=180^\circ$ 时可达 1.5 GHz)。

再增大频率时,平面结构的天线与有夹角的天线的方向性差异增大:有夹角的天线的方向性开始表现出向夹角方向( $-z$  方向)的方向性,如图 7(a) 给出了  $\theta=30^\circ$ 、频率分别为 1、2、3、4 GHz 时的方向图,频率越高方向性更明显,且几种有夹角的天线之间的方向性之间的差异不是很大;平面结构天线 1 GHz 以下为全向性,2 GHz 以下也近似全向性,再增大频率时,方向性的主瓣方向变化很大,最大方向在 3 GHz 时出现在  $X$  的正负方向、在 4 GHz 时又出现在  $Z$  的正负方向,如图 7(b)。

在  $YZ$  平面内,有夹角天线在低频时的方向性在  $Z$  轴正负方向,随着频率增大到一定值时(1 GHz),方向性逐渐向全向过渡,如图 7(c),再增大频率时,方向性也出现在夹角方向,与  $XZ$  平面的方向性相比稍差一些。而平面结构的天线在  $YZ$  平面内没有这种变化,在小于 2 GHz 频率的方向图与半波偶极子天线的方向性类似,最大方向出现在  $Z$  正负方向,天线在  $Y$  的正负方向几乎没有辐射。频率再增大时,方向图波瓣出现分裂,如图 7(d)。



(a)  $\theta=30^\circ$  时,  $XZ$  平面方向图比较

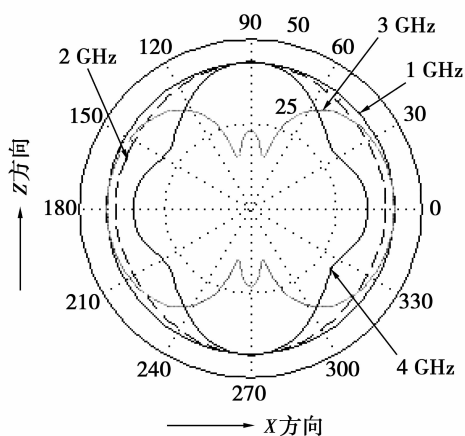
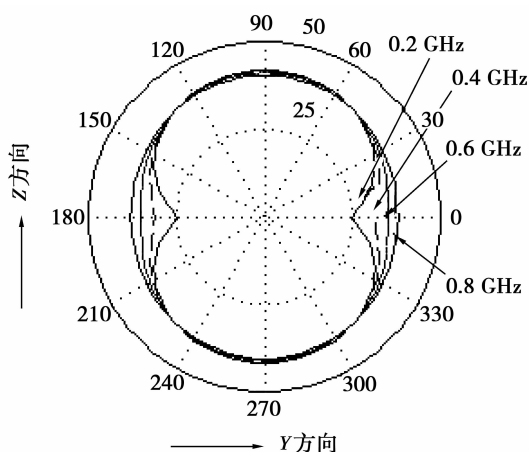
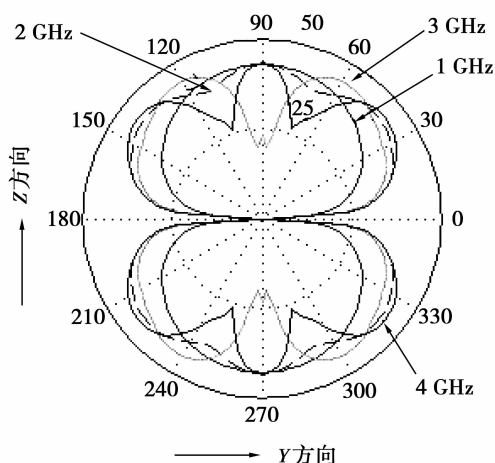
(b) XZ 平面方向图随频率的变化( $\theta=180^\circ$ )(c) YZ 平面方向图( $\theta=30^\circ$ )(d) YZ 平面方向图随频率的变化( $\theta=180^\circ$ )

图7 天线方向图比较

## 4 结论

基于 RWG 基函数的矩量法是一种有效的电磁场数值分析方法,利用这种方法,笔者主要分析了在宽频率范围内的天线的性能参数与天线两臂夹角的关系,由仿真结果分析可知:小夹角在频带内的辐射

能力更强,大夹角越有利低频的辐射,有夹角的天线方向更强,主要表现在夹角方向,夹角越大,在高频区的天线增益越大。平面天线的输入阻抗、辐射功率、天线增益在频带内变化幅度更小。

## 参考文献:

- [1] RAO S S M, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, AP-30(3): 409-418.
- [2] 张云华. 用基于 rao-wilton-glisson 基函数的矩量法分析天线[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(6): 1105-1108.  
ZHANG YUN-HUA. MoM analysis of linear dipole antenna using rao-wilton-glisson basis functions [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(6): 1105-1108.
- [3] 董健, 柴舜连, 毛钧杰. 任意形状线、面、体组成导体目标的电磁建模[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1654-1659.  
DONG JIAN, CHAI SHUN-LIAN, MAO JUN-JIE. Electromagnetic modeling of conductor object composed of arbitrary shaped line, surface and volume [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1654-1659.
- [4] LEAT C J, SHULEY N V, STICKLEY G F. Triangular-patch modeling of bowtie antennas: validation against brown and woodward [J]. IEE Proc Microwave Antennas Propagation, 1998, 145(6): 465-470.
- [5] YAN M, TIAN M, ZHU Q P, et al. Design and realization of a compact, low-cost, ultra wideband ground penetrating radar system [C] // 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, September 23-26, 2005, WCNM2005, Wuhan, China. Piscataway: IEEE Press, 2005: 364-367.
- [6] NILAVALAN R, HILTON G S, BENJAMIN R. Wideband printed bowtie antenna element development for post reception synthetic focusing surface penetrating radar [J]. Electronics Letters, 1999, 35(20): 1771-1772.
- [7] 李太全. 探地雷达天线系统的设计、实现与优化 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [8] SHLAGER K L, SMITH G S, MALONEY J G. Optimization of bow-tie antennas for pulse radiation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(7): 975-982.
- [9] LIU L L, SU Y, HUANG C L, et al. Study about the radiation characteristics of bow-tie antennas with discrete resistor-loaded [C] // Microwave Conference Proceedings, APMC-2005, Asia-Pacific Conference Proceedings, December 4-7, 2005, Suzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2005: 3.
- [10] ZHENG G P, KISHK A A, YAKOVLEV A B, et al. A broad band printed bow-tie antenna with a simplified

- feed [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium, June 20-25, 2004, Monterey, California. Piscataway: IEEE Press, 2004:4024-4027.
- [11] ANDRENKO A S. Comparative study of wideband properties of planar solid and stri Pfractal bow-tie dipoles [ C ] // 2005 IEEE/ACES International Conference on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, April 3-7, 2005, Honolulu, Hawaii, United States. Piscataway: IEEE Press, 2005:178-181.
- [12] 魏福显,王春和.电阻加载蝶形天线的性能研究[J].物探与化探.2006,30(5):427-429.  
WEI FU-XIAN,WANG CHUN-HE. The capability of the bowtie antenna loaded with a resistor [ J ]. Geophysical & Geochemical Exploration. 2006, 30(5): 427-429.
- [13] 马卡洛夫. 通信天线建模与 MatLab 仿真分析[M]. 许献国,译. 北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [14] 王均宏,任朗,简水生. V形振子脉冲天线的形状优化[J]. 通信学报,1998,19(8):45-49.
- WANG JUN-HONG, REN LANG, JIAN SHUI-SHENG. Optimization of the dipole shapes for maximum peak values of the radiating pulse [J]. Journal of China Institute of Communications, 1998, 19(8):45-49.
- [15] MAKAROV S N. MoM antenna simulations with matlab;RWG basis functions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2001, 43(5):100-107.
- [16] 赵延文,裴在平,徐建华,等.基于 RWG 基函数的伽略金法中奇异性积分的精确快速计算[J].电子学报,2005,33(6):1019-1023.  
ZHAO YAN-WEN, NIE ZAI-PING, XU JIAN-HUA, et al. Accurate and efficient calculation of singular integrals in galerkin method with RWG basis functions[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(6):1019-1023.
- [17] BALANIS C A. Antenna theory: analysis and design[M]. 2nd ed. New York: John Wiley&Sons, 1997: 133-136.

(编辑 张 苹)

(上接第 774 页)

## 参考文献:

- [ 1 ] KOSKO B. Adaptive bidirectional associative memories [J]. Applied Optics, 1987,26 (23): 4947-49.
- [ 2 ] KOSKO B. Bidirectional associative memories [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988,18(1):49-60.
- [ 3 ] KOSKO B. Unsupervised learning in noise[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1990,1(1):44-57.
- [ 4 ] DOMANY E, VAN HEMMEN J L, SCHULTEN K. Models of neural networks[M]. Berlin:spring, 1991.
- [ 5 ] VAN DEN DRIESSCHE P, ZOU X. Global attracting in delayed hopfield neural network model[J]. SIAMJ, 1998,58; 1879-1890.
- [ 6 ] GOPALSAMY K, HE X Z. Delay-independent stability in bidirectional association memory networks [ J ]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994,5 :998-1002.
- [ 7 ] LIAO X, YU J. Qualitative analysis of bi-directional associative memory networks with time delays[J]. Int J Circ Theor, 1998; 26:29-219.
- [ 8 ] LI C D, LIAO X F. Delay-dependent exponential stability analysis of bidirectional associative memory neural networks: an LMI approach[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005,24(4): 1119-1134.
- [ 9 ] CHEN A, CAO J D, HUANG L. Exponential stability of BAM neural networks with transmission delays[J]. Neuro Computing, 2004, 57:54-435.
- [10] ZHAO H Y. Global stability of bidirectional associative memory neural networks with distributed delays [J]. Phys Lett A ,2002,297:90-182.
- [11] CAO J. Global asymptotic stability of delayed bi-directional associative memory neural networks [J]. Applied Math Computer, 2003, 142:333.
- [12] CAO J D, WANG L. Exponential stability and periodic oscillatory solution in BAM neural networks with delays[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002,13(2): 457-463.
- [13] GUAN Z H, JAMES L, CHEN G. On impulsive auto-associative neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2000,13:63.
- [14] GUAN Z H, CHEN G R. On delayed impulsive hopfield neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999,12 : 273-280.
- [15] LI Y K. Global exponential stability of BAM neural networks with delays and impulses[J]. Chaos, Solitons and Fractals 2005, 24: 279-285.
- [16] XIA Y H, HUANG Z K, HAN M. Existence and globally exponential stability of equilibrium for BAM neural networks with impulses[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 08:45.
- [17] HUAN G Z, XIA Y H. Global exponential stability of BAM neural networks with transmission delays and nonlinear impulses[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 11:32.
- [18] CHEN J, CUI B T. Impulsive effects on global asymptotic stability of delay BAM neural networks[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2007,01:42.
- [19] LOUX Y, CUI B T. Global asymptotic stability of delay BAM neural networks with impulses[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2006, 29(4): 1023-1031.
- [20] LOU X Y, CUI B T. Global asymptotic stability of delay BAM neural networks with impulses based on matrix theory [J]. Applied Mathematical Modelling. 2008, 32(2): 232-239.

(编辑 侯 湘)