

文章编号:1000-582X(2009)08-0925-06

螺旋天线特性的数值分析

张承畅¹, 李长勇^{1,2}, 康小平², 陈于平³

(1. 重庆大学 通信与测控中心, 重庆 400030; 2. 解放军重庆通信学院, 重庆 400035;
3. 解放军通信指挥学院, 武汉 430000)

摘要:利用基于RWG(rao-wilton-glisson)基函数的矩量法求平面螺旋天线和圆锥螺旋天线表面电流,并进一步计算出天线的输入阻抗、方向性、增益、辐射功率、空间电场大小。分析结果显示这两种天线的输入阻抗值约为自互补结构天线的输入阻抗的理论值(满足巴比涅原理),即空间本征阻抗 $1/2, 188.5 \Omega$;方向性、增益和辐射功率大小在这一频带内也比较稳定。在高斯微分脉冲激励下,结合傅立叶反变换方法得到时域的辐射脉冲电场波形,从波形可知螺旋天线用作脉冲辐射天线时,辐射电场波形具有高斯二次微分特性。

关键词: RWG 基函数; 螺旋天线; 输入阻抗; 方向图; 辐射电场
中图分类号: TN820 **文献标志码:** A

Numerical analysis on the performance of spiral antennas

ZHANG Cheng-chang¹, LI Chang-yong^{1,2}, KANG Xiao-ping², CHEN Yu-ping³

(1. Center of Communication and Tracking Telemetry Command, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Chongqing Communication institute of P. L. A., Chongqing 400035, P. R. China; 3. Commanding Communications Academy of P. L. A, Wuhan 430010, P. R. China)

Abstract: The surfaces of the Planar Spiral Antennas and Conical Spiral Antennas are analyzed with planar triangle. The surface currents of the antennas are solved by using the Method of Moment (MoM) based on the RWG basis function. The input impedance, directivity, gain, radiated power and radiation field of the antenna can be found. The results indicate that, in very wide frequency band, the value of the input impedance equals to the theoretical value of Self-Compensated antennas (in agreement with Babinet-booker principle), which is, 188.5 ohm, the half of the wave impedance of free space, while the directivity, gain and radiated power are stable within the frequency band. When the antenna is driven by the signal of derivative Gaussian pulse, the radiating electric field waveform is obtained by the Fourier transform. When the spiral antenna is used as the pulse radiation antenna, the waveform of the radiation electric field shows the characteristics of the Gaussian quadratic differential.

Key words: RWG basis function; spiral antennas; input impedance; directivity; radiating electric field

在基于冲激脉冲发射的超宽带 (ultra-wide band, UWB) 通信或雷达技术中要用到的超宽带天

线是一个值得研究的问题。这些系统中的冲激脉冲, 脉冲宽度在纳秒(ns)级或亚纳秒级, 频带宽度在

收稿日期: 2009-03-10

基金项目: 重庆市院士基金资助项目(CSTC2008BC2001)

作者简介: 张承畅(1975-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事软件无线电, 雷达方向研究, (Tel)13206117568;

(E-mail)zcc_918@163. 欢迎访问重庆大学期刊社 <http://qks.cqu.edu.cn>

吉赫兹(GHz)级,倍数带宽(最高频率与最低频率之比)达 10:1,这种频带对天线提出了很高的要求。天线性能的好坏对通信性能和雷达探测效果有重要影响。用于脉冲发射的天线有双锥天线或单锥天线,以及其平面结构的领结天线^[1],TEM 喇叭天线^[2]等,为了更好的进行雷达接收后续信号处理及提高探测效果,展宽天线的带宽,减小脉冲的失真是研究的一条主线^[3]。螺蛳天线是一种频率无关天线,在很宽的频带内有平坦的幅频特性,带宽的高频受限于螺蛳的内半径,低频受限于外半径,这种天线在雷达、导弹系统中有不少应用研究^[4-7],作脉冲发射时的特性如何值得研究。根据巴比涅—布克原理^[8],平面天线与其互补天线的输入阻抗之积等于自由空间本征阻抗的平方的 1/4,研究的两臂平面等角螺蛳天线和圆锥螺蛳天线旋转 90°时,天线满足自互补和拼合条件,该天线在所有频率上有恒定的阻抗—空间本征阻抗的 1/2。用数值分析方法分析了平面等角螺蛳天线和圆锥螺蛳天线的这些特性。首先对螺蛳天线表面进行三角形剖分,采用了基于 RWG 基函数^[9-11]的矩量法求解平面等角螺蛳天线的表面电流,并进一步分析天线的输入阻抗、方向性、增益、辐射功率。最后利用傅立叶反变换方法得到了空间辐射脉冲时域波形。研究显示,在很宽的一频带内,天线的输入阻抗值约为自互补结构天线的输入阻抗的理论值,即空间本征阻抗的 1/2,188.5 Ω;方向性、增益和辐射功率大小在这一频带内也比较稳定。平面等角螺蛳天线和圆锥螺蛳天线可用作脉冲天线,但平面螺蛳天线更有效,辐射电场波形具有高斯二次微分特性。

1 螺蛳天线表面三角形剖分

为了建立 RWG 基函数,在一坐标下对天线表面进行三角形剖分,建立各三角形顶点坐标,具体方法如下。

1) 平面螺蛳线极坐标方程可表示为: $\rho = \rho_0 e^{\alpha(\varphi - \delta)}$,在内半径 $\rho_0 = 0.5 \text{ cm}$,扩展率 $\alpha = 0.221$,要形成螺蛳天线的两臂,需要四条螺蛳线,因此取 $\delta = 0, \pi/2$ 时螺蛳线构成天线的第一臂, $\delta = \pi, 3\pi/2$ 时的螺蛳线构成天线的第二臂。在这种情况下,天线臂转动二圈(4π)和二圈半(5π)时的外半径长分别为 8、16 cm,螺蛳两臂限定在以外半径为大小的圆内使得天线的两臂与两臂间的空隙具有完全相同的形状和面积,保持自互补对称性。

2) 圆锥螺蛳线的极坐标方程可表示为:

$\rho = \rho_0 e^{(\alpha \sin \theta_0)(\varphi - \delta)}$,这是三维坐标。 θ_0 为圆锥半顶角,

取 $\theta_0 = 15^\circ$, δ 取法同平面螺蛳天线,顶端半径也为 0.5 cm,在天线臂转动五圈(10π), $\alpha = 0.3$ 和 0.5 时的圆锥螺的底端半径分别约为 3、15cm,这时的高分别约为 11、55 cm。

天线三角形网格建立方法:每臂沿螺蛳方向再三等分得到四条螺蛳线, φ 以 $\pi/18$ 为步进取值得到螺蛳线上的坐标点,这些点就构为三角形顶点,每个三角形的中心点坐标也可计算出。利用 MATLAB 函数 delaunay 进行三角形网格处理并去掉两臂之间的三角后可得到螺蛳天线图形,图 1、2 给出了外半径 16 cm 的平面天线图和高 55 cm 的圆锥天线图。螺蛳中心部分网格结构处理为对称形式,天线的馈电点在天线的中心的三角形边上,如图 3 所示,图中给出了平面天线的中心结构和圆锥天线的顶端结构。

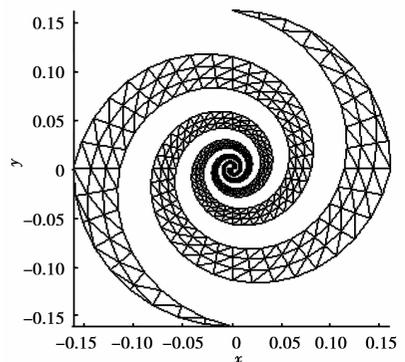


图 1 平面螺蛳天线三角网格图

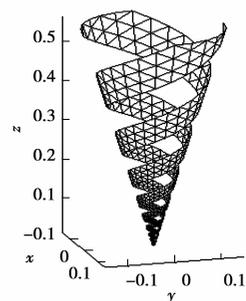


图 2 圆锥螺蛳天线三角网格图

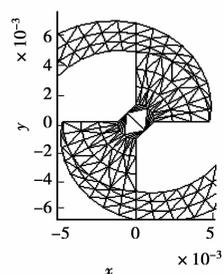


图 3 天线中心网格图

2 基于 RWG 基函数的矩量法

螺旋天线表面三角剖分后,每相邻两三角(T_m^+ 与 T_m^-)构成一 RWG 边元模型,与这个边元相应有一个 RWG 子域基函数 $f_m^{[9-11]}$ 。天线上每一边元的电流密度 J 表示为基函数的线性组合

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

其中: M 是边元数目; l_m 是边元 m 的长度(两三角形公共边的长度); A_m^\pm 是三角形 T_m^\pm 的面积;矢量 $\boldsymbol{\rho}_m^+$ 是从三角形 T_m^+ 的自由顶点指向观察点 r ,矢量 $\boldsymbol{\rho}_m^-$ 是从观察点 r 指向三角形 T_m^- 的自由顶点。 I_m 为待求电流密度系数。用基函数表示的电流密度替换天线电流积分方程中电流密度,用伽略金法进行检验后得到矩阵方程

$$[\mathbf{Z}_{mn}] [\mathbf{I}_m] = [\mathbf{V}_m], \quad (2)$$

这里的 m, n 都取天线三角形剖分后的三角对(RWG边元)数目,其中 Z_{mn} 由已知的基函数与格林函数的电场积分方程求解出来^[9],这是矩量法求解的核心,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^[12]。物理意义为不同边元之间相互作用的阻抗矩阵, Z_{mn} 表示等效偶极子(边元) n 通过辐射场对等效偶极子(边元) m 的电流贡献, Z_{mn} 反过来表示等效偶极子(边元) m 通过辐射场对等效偶极子(边元) n 的电流贡献。阻抗元素可参考文献^[9]。

V_m 对应每个边元的激励,对于接收天线,入射电场在每个边元上产生的激励可计算出来^[9];对发射天线,天线馈电(激励电压) V 只加在坐标原点处(一般建立这样的坐标)的一个边元或几个边元上,除这个边元以外的其他边元,没有激励($V_m = 0$)。计算这个边元激励方法有多种,由于采用 RWG 基函数,把这个边元的公共边等效为一小间隙,用 δ 函数发生器法描述间隙间的场^[13-14]。

矩量法求出 \mathbf{I}_m 后,利用式(1)可得 RWG 边元或每一个三角形的表面电流。有了表面电流,空间任一点的电磁场也可求得,这里可采用偶极子模型法^[15],该边元的表面电流分布用具有等效偶极子矩量或强度为无穷小的小偶极子代替,辐射远场为所有等效偶极子辐射场子之和。在此基础上可进行天线性能参数如增益、辐射功率、方向性的分析。通过

馈电处的电流电压可计算天线的输入阻抗。

3 天线宽频带特性数值结果

矩量法的一次计算只能得到在一个频点下的结果,为了分析天线在宽频带内的参数,如频带为 $0 \sim 5$ GHz,分析方法为:假设天线输入电压保持 1 V不变,以 12.5 MHz为间隔,共 400 个频率点,利用上面的方法用 MATLAB7 编程分别计算,这样,可得到每个频率下天线表面电流分布以及每个频率下的天线输入阻抗、增益、方向图、空间一点的辐射电磁场与辐射功率等。

图 4(a)给出了外半径为 16 cm 平面等角螺旋天线在 $0 \sim 5$ GHz 内的输入阻抗。频率在大于 0.5 GHz 时,输入阻抗变化很小,曲线平坦,输入阻抗的实部在 $183 \sim 190 \Omega$ 之间,虚部在 $0 \sim -32 \Omega$ 之间,天线的输入阻抗近似等于自互补结构天线的输入阻抗的理论值 188.5Ω (满足巴比涅原理)。当天线的外半径为 8 cm 这个频率点增大到 1 GHz 其输入阻抗才有很小变化,如图 4(b)。天线的阻抗带宽为平坦输入阻抗曲线所在的频率范围,天线的频带上、下限频率由天线的内、外半径大小决定。考查这两种外半径的天线的下限频率,可知天线外半径增大一倍,其下限频率就减小一倍,并且外半径大小约为下限频率波长的 $1/4$ 。

图 4(c)和图 4(d)分别给出了两种尺寸圆锥螺旋天线的输入阻抗曲线,在很宽的频带内,其值也近似为自互补结构天线的理论值,并且研究也显示不受锥角 θ_0 的影响。频带下限频率与圆锥底半径满足的关系与平面螺旋相同,同时可以看到,圆锥天线的输入阻抗曲线在低频端的振荡次数也更多,由于圆锥螺旋臂旋转的圈数更多(10π)。

两类天线在外形尺寸不变时, α 越小,螺旋旋转的圈数越多,但对天线频带内的输入阻抗的影响不大。

图 5(a)和 5(b)分别给出了平面螺旋和圆锥螺旋天线的方向图,由于同一种天线的 xz 平面和 yz 平面的方向图基本一致,因此只给了了 xz 平面方向。平面螺旋天线^[16]辐射方向在垂直于天线平面的两法线方向。圆锥螺旋天线方向性在圆锥顶指向方向,并且锥角 θ_0 越小,方向性越强。进一步的研究可显示,在相同外形尺寸下, α 越小,螺旋圈数更多,主方向波束宽带稍有加宽。两种天线在输入阻抗平坦的频带内方向性随频率的变化不大。

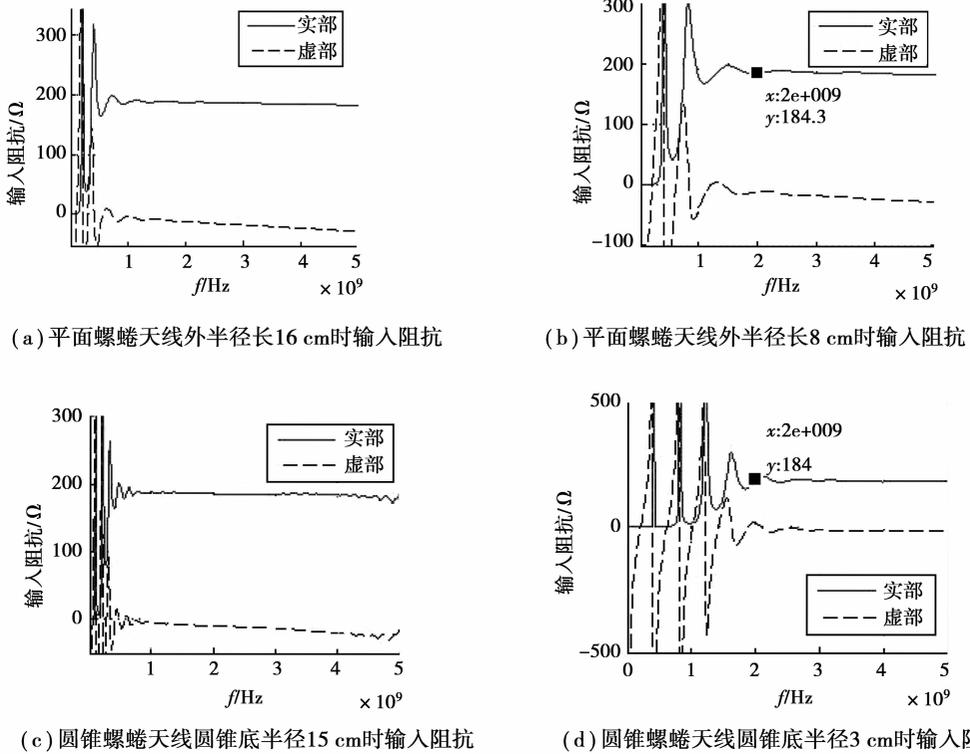


图 4 天线宽频带特性

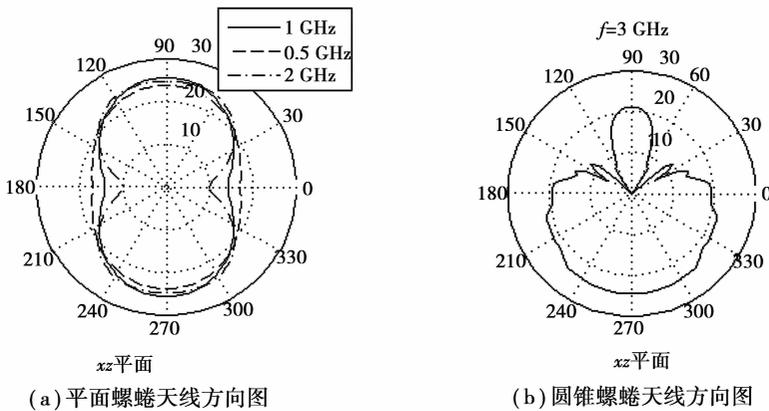


图 5 平面、圆锥螺旋天线方向图

图 6、7 给出了外半径 16 cm 平面螺旋天线在 0~5 GHz 频带内的增益和辐射功率,在频率大于 0.5 GHz 后,天线的增益在 4~6 dB,辐射功率在 2.7 mW 左右。

这说明在输入阻抗平坦的频带内增益与辐射功率也保持比较稳定的数值,这种特性在圆锥螺旋天线上也同样存在。

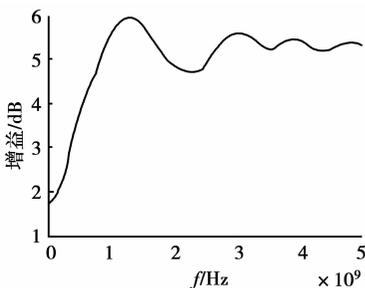


图 6 平面螺旋天线增益

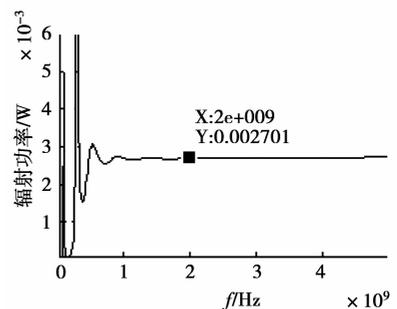


图 7 平面螺旋天线辐射功率

4 天线脉冲辐射特性

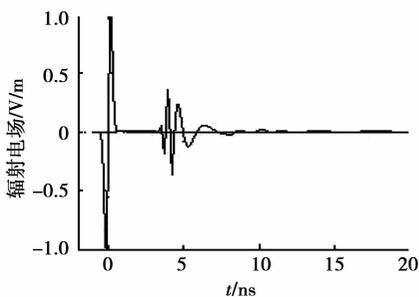
以上分析是在频域对天线进行分析,下面计算脉冲信号激励下天线时域辐射电场波形。首先分别计算出输入电压保持 1 V 不变,频率在 0~5 GHz 内 400 个频点的空间某点处的辐射场,这可定义这时的辐射场为天线—自由空间转移函数。天线转移函数乘以脉冲信号的频谱,再经过离散傅立叶反变换(IDFT)就可得到空间的辐射电场波形。天线的激励脉冲采用如下形式高斯微分脉冲

$$p(t) = \frac{t}{\sigma} \exp(-t^2/2\sigma^2), \quad (8)$$

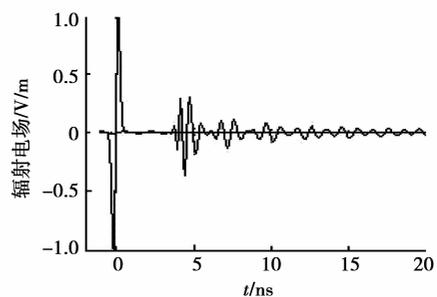
σ 为脉冲的特征时间参数,考虑脉冲的有效持续时间为 $7\sigma=1$ ns 时情况,其频谱峰值处的频率约为 1 GHz,脉冲的频谱主要在 0~5 GHz 内,半功率

频谱带宽为 0.6~2 GHz。

图 8 给出了位于圆锥螺旋天线中心轴离锥顶 1 m 处的辐射电场波形,图中的前一波形为幅度归一化激励脉冲信号。图 8(a)为锥底半径为 15 cm 圆锥螺旋天线辐射波形,与 8(b)相比,由于天线的频带低端截止频率(0.5 GHz)更低,有更多脉冲频谱被辐射,使得辐射脉冲失真更小,基本没有脉冲拖尾,更有利脉冲接收。对平面螺旋天线研究也有类似结果。因此对这种脉冲辐射,主要考查天线低频部分的辐射能力,要想得到更好的波形,得增大天线的尺寸以进一步降低低端截止频率,这在应用中又带来不便,所以存在一个折衷选择。如不考虑方向性,平面螺旋天线有更小的外形尺寸,应用中也可与平面结构的系统设备共形设计。



(a) 锥底半径为 15 cm 圆锥螺旋天线辐射波形



(b) 锥底半径为 3 cm 圆锥螺旋天线辐射波形

图 8 不同半径圆锥螺旋天线辐射波形

5 结 语

对双臂自互补平面螺旋天线和圆锥螺旋天线的研究分析可知,其输入阻抗在工作频带内满足巴比涅原理,其值约为自由空间波阻抗的 1/2,即 188.5 Ω 。天线的频带的上下限值由天线的内外半径大小决定,天线的其它参数在一很宽的频带内都保持比较稳定的数值,这种频率无关天线的特性再次用数值分析方法得到证实,也说明基于 RWG 基函数的矩量方法分析天线是一种有效方法。研究天线的脉冲辐射特性可知,由于脉冲信号占有很宽的频带,天线带宽的低端截止频率越小对脉冲辐射越有利,从时域辐射电场波形看,天线对输入激励脉冲有微分特性。

参考文献:

[1] 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.

[2] SHLAGER K L, SMITH G S, MALONEY J G. Accurate analysis of TEM horn antennas for pulse radiation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1996, 38(3):414-423.

[3] 李长勇, 杨士中, 张承畅. 超宽带脉冲天线研究综述 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(5):1003-1008.

LI CHANG-YONG, YANG SHI-ZHONG, ZHANG CHENG-CHANG. Review of ultra-wide band pulse antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5):1003-1008.

[4] 陈小娟, 袁乃昌. 平面螺旋天线的设计与实现[J]. 雷达与对抗, 2004(4):31-33.

CHEN XIAO-JUAN, YUAN NAI-CHANG. Design and implement of a planar spiral antenna[J]. Radar and Countermeasure, 2004, 4:31-33.

[5] HISAMATSU N, HAJIME Y, YAMAUCHI J.

Numerical analysis of Two-Arm spiral antennas printed

- on a finite-size dielectric substrate [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(3):362-370.
- [6] BUCK M D, Filipovic. Bi-layer four-arm spiral antennas[J]. Electronic Letters, 2007, 43(6):10-11.
- [7] 宋朝晖,邱景辉,张胜辉,等.一种平面等角螺旋天线及宽频带巴伦的研究[J]. 制导与引信,2003,24(2):36-39.
SONG ZHAO-HUI, QIU JING-HUI, ZHANG SHENG-HUI, et al. Study of a planar equiangular spiral antenna and the relevant wideband balun[J]. G & F, 2003,24(2):36-39.
- [8] KRAUS J D, MARHEFKA R J. 天线(第三版)(上册)[M]. 章文勋,译.北京:电子工业出版社,2006.
- [9] SADASIVA M R, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982,30(3):409-418.
- [10] 张云华. 用基于 rao-wilton-glisson 基函数的矩量法分析线天线[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.
- [11] 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.
- [12] 赵延文,聂在平,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.
- [13] MAKAROV S N. MoM antenna simulations with Matlab;RWG basia functions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2001, 43(5):32-34.
- [14] MAKAROV S N. Antenna and EM modeling with MATLAB[M]. New York:John Wiley and Sons,2002.
- [15] LEAT C J, SHULEY N V, STICKLEY G F. Triangular-patch modeling of bowtie antennas: validation against brown and woodward[J]. Microwave Antennas Propagation,1998,145(6):465-470.
- [16] 李长勇,陈于平,刘郁林,杨士中. 矩阵法分析平面等角螺旋天线的脉冲辐射特征[J]. 微波学报,2009, 25(1): 13-16.
LI CHANG-YONG, CHEN YU-PING, LIU YU-LIN. Pulse radition characteristic of planar equiangular spiral antemas based on the method of moment[J]. Journal of Mircowares, 2006,25(1):13-16.

(编辑 侯 湘)