

王友成, 邵金进, 纪奕才, 等. 末端开槽超宽带天线的研究 [J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 510-516. doi: 10.13443/j.cjors.2014060301
WANG Youcheng, SHAO Jinjin, JI Yicai, et al. Analysis on multi-slot tuned ultra-wideband antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(3): 510-516. (in Chinese). doi: 10.13443/j.cjors.2014060301

末端开槽超宽带天线的研究

王友成^{1,2} 邵金进^{1,2} 纪奕才² 方广有² 张晓娟²

(1. 中国科学院大学, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所 电磁辐射与探测技术重点实验室, 北京 100190)

摘 要 基于常规平面半椭圆偶极天线形式, 研究了末端开槽天线的特性, 分析了四种不同的末端开槽方式对天线驻波系数、端口阻抗、群延时等特性的影响. 在仿真分析比较了天线末端采用半圆面开槽、电阻加载的方式、开槽单元数量以及背腔形式对天线特性影响的基础上, 设计了一种中心频率为 400 MHz 的平面半椭圆、末端双半圆面开槽加载以及 V 形金属背腔的新型超宽带天线, 加工制作并测试了该天线. 测试结果表明: 该天线阻抗带宽优于两个倍频程, 波形保真度高; 同时该天线成本低廉易于集成, 能够应用于穿墙成像雷达.

关键词 超宽带天线; 末端开槽; 时域特性; 加载

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2015)03-0510-07

Analysis on multi-slot tuned ultra-wideband antenna

WANG Youcheng^{1,2} SHAO Jinjin^{1,2} JI Yicai²

FANG Guangyou² ZHANG Xiaojuan²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Characteristics of ultra-wide band (UWB) antenna are studied with end slot-tuned. Based on traditional half-ellipse planar antenna, the impacts of four different tuned slots etched on the antenna end including half ellipse, triangle planar, rectangle planar and sine planar on some antenna characteristics, such as voltage standing wave ratio (VSWR), input impedance, group delay are analyzed. By simulation and analysis, semicircle slot-tuned and resistive-loaded is chosen, and the influence of the number of tuned slots and the distinctive shape of the cavity on antenna performance is analyzed. One novel half-ellipse planar antenna with two half-circle tuned slots and a V-shape cavity operating at a 400 MHz center frequency is designed. This antenna is manufactured and measured. Test results show that the proposed antenna has a large impedance band up to two octaves, high fidelity on time domain waveform. Additionally, this antenna costs low and can be applied in through-wall life detecting radar easily.

Key words UWB antenna; end slot-tuned; time domain character; load

收稿日期: 2014-06-03

资助项目: 国家 863 计划(2012AA061403)

联系人: 王友成 E-mail: wangyoucheng99@163.com

引言

近几十年,基于超宽带探测技术的穿墙成像雷达在军事反恐、生命探测等领域具有较大应用价值而迅速发展.天线作为雷达系统的一个关键部件,扮演着有效辐射和接收电磁波、完成能量转换的角色,其性能直接影响雷达系统的分辨率和探测距离.目前在脉冲体制穿墙成像雷达中应用较多的天线有阻抗加载蝶形天线、TEM 喇叭天线和 Vivaldi 天线^[1-7]. TEM 喇叭天线和 Vivaldi 天线增益高、方向性好,但存在与墙面耦合不好的问题,并且体积较大,不利于系统的便携式设计.平面蝶形天线^[8-10]由于具有较好的时域宽带特性、简单的加工方式以及易于集成等优点,受到众多研究者青睐.传统平面蝶形天线具有类似偶极子的全向辐射特性,通常需要引入金属背腔以增强方向性和抑制外界电磁干扰.为了减小金属背腔对天线端口特性和时域辐射波形的影响,一般需要在腔中填充吸波材料^[11-12]或在天线末端加载电阻^[13-14],具体方式则需要比较成本与制作方式进行折中考虑.

针对穿墙成像雷达的需要,基于末端电阻加载的半椭圆偶极天线^[15],通过优化天线尺寸,分析天线末端开槽形式、开槽数目以及背腔形式对天线性能的影响,设计了一款时域特性和端口特性良好的超宽带天线样机.

1 天线结构及仿真实验

1.1 天线末端四种开槽形式仿真

天线由一对平面半椭圆臂构成,末端开槽采用如图 1(a)、(b)、(c)、(d)所示的四种结构.天线中心馈电间隔 $F_d = 2$ mm,整个天线臂长为 $L_a = 190$ mm,天线臂最宽处为 $W_a = 90$ mm.天线基板为 FR4,介电常数为 4.4,厚度为 1.0 mm.平面蝶形(bow-tie)天线作为一种宽带偶极子天线形式,当天线臂上电流分布具有类似行波特特性时,将能获得良好的带宽特性和较小的时域拖尾振铃.然而,有限尺寸的 bow-tie 天线由于末端截断效应通常会使得天线臂上残余电流形成多次反射,从而导致端口特性变差、增加振铃.为了减小天线末端的反射电流,电阻加载是比较简单有效的手段.为了便于加载电阻更好地吸收残余电流,本文针对半椭圆天线臂的末端进行开槽处理,研究了不同的末端开槽方式对天线特性的改善作用,采用的开槽形式分别为矩形面、半正弦、半椭圆、三角面,每种开槽形式的数目为三

个,宽度为 $w_c = 23.3$ mm,长度为 $L_c = 20$ mm,加载电阻置于在开槽形成的锐化部位,电阻阻值均取 $150\ \Omega$.考虑到加载电阻的安装要求,开槽后的锐化部位宽度固定为 $d = 5$ mm.

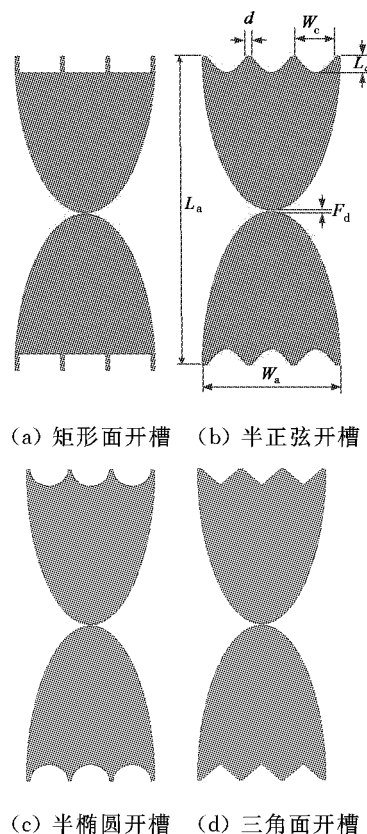


图1 四种开槽天线形式

同时,为了避免后向辐射以及抑制自由空间杂波干扰、增强天线方向性和拓展低频段带宽,设计中采用了一种 V 形结构的金属背腔^[16].针对上述的开槽形式和背腔结构,本文采用电磁仿真软件 Ansoft HFSS 进行相应的仿真分析.

对于超宽带天线设计,为了实现良好的宽带特性,一般要求端口阻抗中实部和虚部变化平缓,实部数值稳定地围绕一个固定值起伏,虚部则尽量接近零,以便于后期阻抗匹配设计.针对四种不同的开槽形式,本节分别给出了相应的端口阻抗特性曲线,仿真结果如图 2 所示.可以看到,半椭圆开槽下的端口阻抗实部最为平坦,接近 $100\ \Omega$;虚部接近零,并保持缓变趋势.虽然其它三种开槽形式下的天线端口阻抗趋势基本保持一致,实部也都围绕 $100\ \Omega$ 波动,虚部在零周围震荡,但相比半椭圆开槽形式,天线端口阻抗变化幅度较为剧烈.四种不同开槽形式的天线电压驻波系数仿真结果见图 3,其中半椭圆开槽

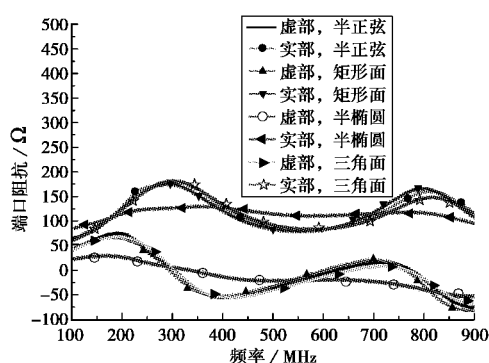


图2 四种开槽天线端口阻抗

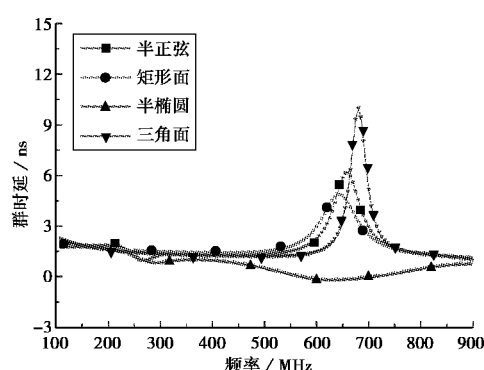


图4 四种开槽天线群时延

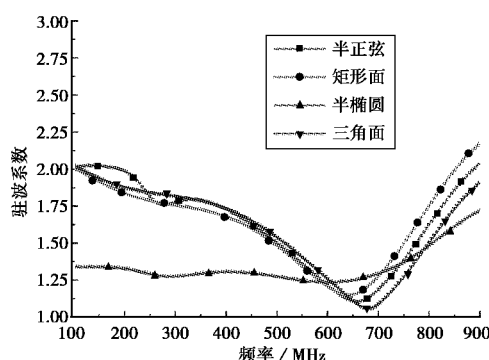


图3 四种开槽天线驻波系数

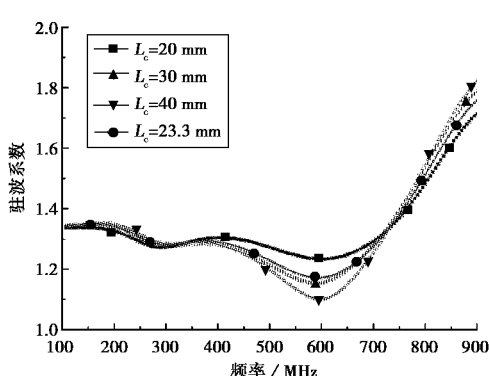


图5 三个半椭圆不同开槽长度驻波系数

形式的驻波系数在 100~800 MHz 频率范围内均小于 1.5, 在高频段小于 1.75. 其它三种开槽形式的天线驻波系数基本一致. 半正弦开槽天线驻波系数在低频端最差, 略大于 2; 矩形面开槽天线驻波系数在高频端约为 2.00~2.25. 从仿真结果中可以看到, 半椭圆开槽驻波特性最好, 驻波系数小于 1.75 时阻抗带宽超过两个倍频程. 为了说明天线的频率响应特性, 图 4 比较了四种末端开槽天线的群时延, 可以看到, 三角面开槽天线的群时延在 700 MHz 附近有较大跳变, 半椭圆开槽天线在通带内趋势平缓, 幅度小于 3 ns. 相比而言, 半椭圆末端开槽形式下的天线端口阻抗最平坦, 通带内驻波系数较小, 群时延变化平缓. 这意味着半椭圆开槽的天线形式有利于馈电时的阻抗变换, 端口反射较小、时域信号拖尾振铃可以得到抑制. 因此, 在天线设计中选择具有三个半椭圆的开槽形式是比较合适的.

1.2 开槽数量及背腔类型仿真实验

为了进一步优化天线端口特性, 本节针对半椭圆开槽的数目和开槽长度进行了仿真分析, 以期获得最佳的天线特性. 首先保持开槽数目为三个不变, 调整半椭圆开槽长度 L_c (长半轴), 比较了不同开槽长度对天线驻波系数的影响. 仿真结果见图 5, 可以

看到当 $L_c = 23.3$ mm 时, 天线的驻波系数在高频段稍高于 $L_c = 20$ mm, 在中频段优于 L_c 为 20 mm 或 30 mm 的开槽形式. 在低频段, 半椭圆开槽长度对驻波系数影响甚微. 因此, 选取半椭圆开槽长度为 23.3 mm 是比较合适的. 此时, 半椭圆开槽的长半轴与短半轴比率为 1, 即开槽形式为半圆面. 这说明, 当末端开槽数目为三个时, 开槽形式为半圆面可以获得最优的阻抗带宽.

调整半圆面开槽的数目, 分析天线端口特性的变化. 随着开槽的数目变化, 开槽形成的锐化部位和加载电阻的数目也会相应地改变. 此处分析比较了末端半圆面开槽数目为 1~3 个时天线的端口特性, 图 6 给出了不同数目半圆面开槽时对应天线的端口阻抗, 从图中可以看到, 当半圆面开槽数目为两个时, 天线端口阻抗分布最为平缓, 实部在 100 Ω 左右, 虚部接近 0, 一个或三个半圆面开槽形式的天线端口阻抗变化幅度则相对更剧烈. 在图 7 中, 可以看到双半圆面开槽形式的天线驻波系数在 500 MHz 以下优于 1.25, 小于半圆面开槽数目为一个或三个时的天线驻波系数. 在高频端, 双半圆面开槽天线的驻波略高于一个或三个半圆面开槽天线的驻波系

数,但仍然保持在 1.85 以下. 通过以上分析可以说明,在天线末端开半圆槽时,末端残余电流流向开槽形成的尖锐部位;通过电阻加载,可以有效地吸收残余电流. 然而,当开槽数目过多时,吸收残余电流的作用改善并不明显,表现在天线端口特性上即为驻波系数随开槽数目超过两个时并无太多改善. 综合以上分析,选择两个半圆面末端开槽的天线形式,并在开槽形成的锐化部位加载电阻是不错的选择.

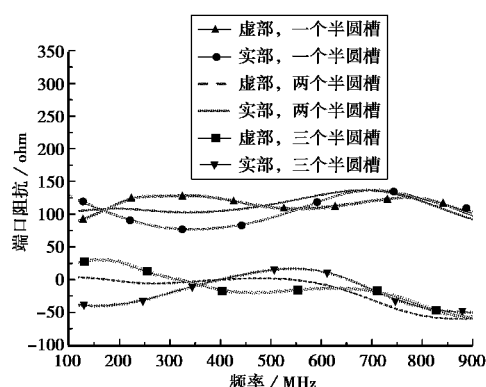


图6 不同数目半圆开槽天线端口阻抗

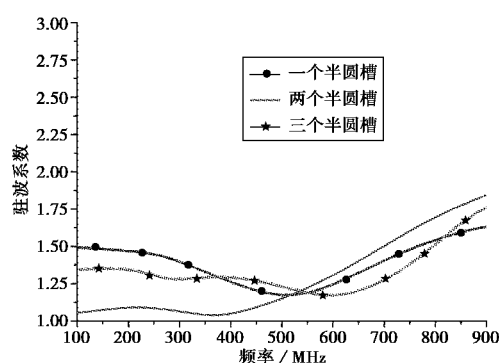


图7 不同数目半圆面开槽天线驻波系数

除了末端开槽的形式和数目,此处还进一步分析了金属背腔的形式对天线特性的影响. 常用天线背腔形式为矩形金属背腔、抛物面腔和凸台腔等^[17-18]. 天线背腔的作用在于形成镜像源,并在近场或远场同相叠加,由此增强方向性或提高增益. 天线背腔的高度一般要求为天线工作中心频率对应的波长四分之一,但实际工程应用中通常会小于这个值. 当天线工作的频带比较宽时,天线背腔的高度对不同频段的影响是不一样的. 此处,我们仿真了三种不同形式的背腔,包括矩形腔、V形腔、指数型腔,并观察这三种类型的背腔对天线端口特性的影响. 这三种类型背腔的长宽均为 400 mm×200 mm,背腔的高度为 51 mm. 其中,V形腔包括两臂对称的斜面

和平行于天线表面的矩形金属面,指数型腔顶面为指数型曲面. 在 V 形腔的顶面中,中间部位的矩形金属面尺寸为 5 mm×200 mm,并距天线表面 30 mm,侧面为两个对称的斜面,连接矩形金属面和背腔的侧臂. 指数形腔顶部曲面数学函数表达式为:

$$\begin{cases} z = a \cdot \exp(b \cdot x); \\ y \in (-c, c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a=31$; $b=2.653$; $c=100$. 应用三种不同类型背腔对应的天线驻波系数仿真结果如图 8 所示,从图中可以看到 V 形腔在低频段明显降低了电压驻波系数,在高频段驻波系数优于矩形腔、略差于指数形腔. 整体上 V 形腔与指数型腔天线的驻波系数相近,均优于矩形腔. 考虑到背腔制作的难易程度,选择 V 形腔.

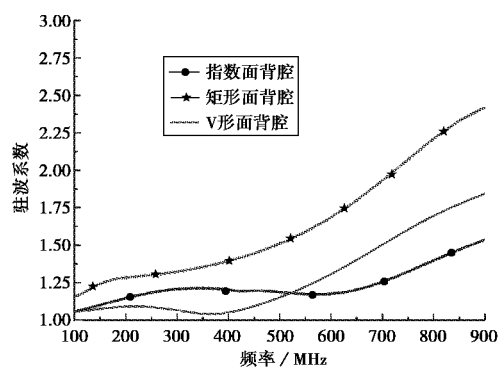


图8 三种类型背腔半圆面开槽天线驻波系数

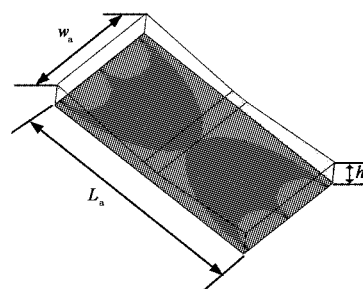


图9 天线结构示意图

2 天线加工测试及实验结果

通过仿真软件对天线馈电间隔、背腔高度等参数优化后,最后加工制作了一对半圆面开槽、V形腔的对称半椭圆天线样机. 天线的端口匹配网络采用 1:2 的商用阻抗变换器 ADTL2-18+, 天线平面示意图见图 1(b), 立体结构示意图见图 9, 尺寸参数见表 1. 天线整体尺寸大小为 400 mm×200 mm×51 mm, 介质基板为 FR4, 其介电常数为 4.4, 厚度

为 1 mm, V 形腔采用薄铁皮加工而成。

表 1 天线尺寸参数								单位: mm
W_a	L_e	h_1	F_d	d	L_a	W_d	W_e	
90	20	51	2	5	190	10	23.3	

利用安捷伦矢量网络分析仪 E5071C 对天线样机的端口特性进行测试, 测得天线的驻波系数如图 10 所示。在图 10 中, 驻波系数实测与仿真结果在低频段吻合较好, 小于 1.25, 并在频带内趋势基本保持一致。由于受环境影响及同轴电缆端口反射等干扰, 高频段实测与仿真结果有一定出入, 但驻波小于 2 时阻抗带宽仍优于两个倍频程。若在天线仿真过程中, 结合实际应用环境引入合适的建筑墙体模型, 由于介质加载效应驻波系数仿真结果在高频段会更低。

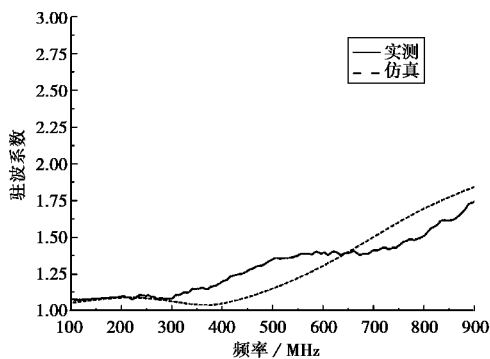


图 10 两个半圆面开槽天线驻波系数测量

由于脉冲体制穿墙成像雷达对天线的时域特性要求较高, 一般要求天线的时域波形保真度高、拖尾振荡小。为验证本文中所设计天线的时域信号的保真度, 加工了一对相同尺寸末端没有开槽的对称半椭圆天线。将两个天线对面放置在一定高度的泡沫板上, 间隔 0.5 m; 使用脉冲发生器产生一个功率为 0 dBm 的二阶高斯脉冲作为激励源对其中一个天线馈电, 另外一个天线则作为接收。分别对接收到的信号进行归一化, 比较给出了两种天线时域波形如图 11 所示。在图 11 中可以看到, 两个半圆面开槽天线时域波形比相同尺寸常规 bow-tie 天线时域波形的拖尾振铃更小。

将本文所设计的一对末端开槽加载天线样机应用于穿墙成像雷达系统, 雷达探测结果如图 12 所示。实验场景为, 雷达置于厚度为 24 cm 普通混凝土墙表面, 一个健康成人位于墙后 4 m 处。在图 12 中可以看到, 对人体目标的胸腔呼吸运动引起的时谐

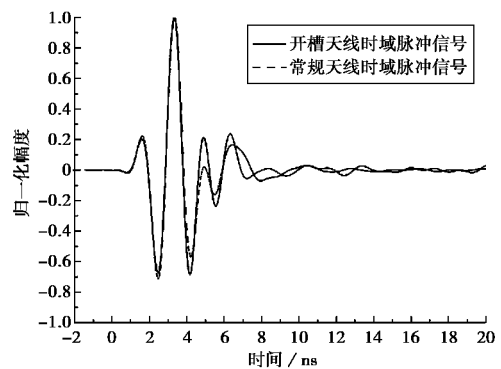


图 11 两种天线时域波形

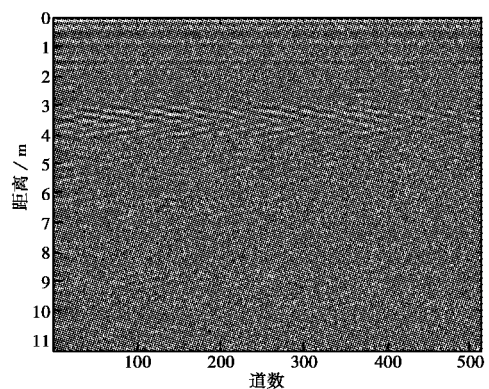


图 12 生命探测雷达实验结果

运动成像效果比较明显, 目标位置大约位于 3.8 m 处。实验结果验证了该天线在穿墙成像雷达系统应用中的有效性。

3 结 论

针对常规平面半椭圆偶极加载天线形式, 分析了末端四种开槽方式对天线端口特性的影响。经过分析比较, 确定了天线末端为半圆面开槽方式。同时针对穿墙成像雷达对天线时域特性及端口特性的要求, 进一步分析了半圆面开槽的数目、金属背腔的类型对天线特性的影响, 并确定采用两个半圆面末端开槽、V 型金属背腔的天线形式。借助电磁仿真软件优化, 确定了天线臂、末端开槽和金属背腔的尺寸, 加载阻值和馈电间隔等。经过加工与测试, 表明该天线阻抗带宽优于两个倍频程、时域波形保真度高, 能够满足穿墙成像雷达的应用需求。

参考文献

- [1] AMINEH R K, RAVAN M, TREHAN A, et al. Near-field microwave imaging based on aperture raster scanning with TEM horn antennas[J]. IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59 (3): 928-940.
- [2] ELBOUSHI A, JOANES D, DERBAS M, et al. Design of UWB antenna array for through-wall detection system[C]//IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA), 2013: 349-354.
- [3] ELSHEAKH D M, ABDALLAH E A. Novel shapes of vivaldi antenna for ground penetrating radar (GPR) [C]// IEEE 7th European Conference on Antennas and Propagation. New York, 2013:2886-2889.
- [4] SHAO Jinjin, FANG Guangyou, FAN Jingjing, et al. TEM horn antenna loaded with absorbing material for GPR applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 523-527.
- [5] KYUNGHO C, PYUN S, JAEHOON C. Design of an ultrawide-band TEM horn antenna with a microstrip-type balun[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(10): 3410-3413.
- [6] LI C, CHANG T, BURNSIDE W D. An ultrawide-bandwidth tapered resistive TEM horn antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(12): 1848-1857.
- [7] YANG Yunqiang, ZHANG Ceming, FATHY A E. Development and implementation of ultra-wideband see-through-wall imaging system based on sampling oscilloscope[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008, 7:465-468.
- [8] NISHIOKA Y, MAESHIMA O, UNO T, et al. FDTD analysis of resistor-loaded bow-tie antennas covered with ferrite-coated conducting cavity for sub-surface radar[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(6): 970-977.
- [9] UDUWAWALA D, NORGREN M, FUKS P, et al. A deep parametric study of resistor-loaded bow-tie antennas for ground-penetrating radar applications using FDTD[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 732-742.
- [10] 周蔚红, 何建国, 周东明. 一种新型探地天线的优化设计[J]. 电波科学学报, 2004, 19(3): 371-373.
ZHOU Weihong, HE Jianguo, ZHOU Dongming. Optimized design of a new kind of GPR planar antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19 (3):371-373. (in Chinese)
- [11] SPURGEON W, EL RAYESS M, DORSEY P, et al. A Summary of Measurements of Permittivities and Permeabilities of Some Microwave Absorbing Materials. <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA223221>, 1990, 2014.
- [12] 刘立业, 粟毅, 毛钧杰. 具有屏蔽腔和吸波材料的探地雷达天线的 FDTD 分析[J]. 电波科学学报, 2006, 21(3):422-427.
LIU Liye, SU Yi, MAO Junjie. FDTD analysis of ground penetrating radar antennas with shields and absorbers[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(3): 422-427. (in Chinese)
- [13] LESTARI A A, YAROVVOY A G, LIGTHART L P. RC-loaded bow-tie antenna for improved pulse radiation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(10): 2555-2563.
- [14] 方广有. 无载波脉冲探地雷达天线及其实验研究[J]. 电波科学学报, 1995, 10(1/2): 75-81.
FANG Guangyou. A study about impulse subsurface survey radar's antenna and its experimental test[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1995, 10 (1/2): 75-81. (in Chinese).
- [15] WU B, JI Y, FANG G. Analysis of GPR UWB half-ellipse antennas with different heights of backed cavity above ground[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 130-133.
- [16] SHAO Jinjin, FANG Guangyou, JI Yicai, et al. Semicircular slot-tuned planar half-ellipse antenna with a shallow vee-cavity in vital sign detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(3): 767-774.
- [17] CHEN Y F, HUANG Y, ZHANG J, et al. Microwave life-detection systems for searching human subjects under earthquake rubble or behind barrier[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2000, 47(1): 105-114.
- [18] CUTLER C C. Parabolic-antenna design for microwaves[C]//Proceedings of the IRE, 1947, 35(11): 1284-1294.

作者简介



王友成 (1986—), 男, 湖北人, 现为中国科学院电子学研究所在读博士研究生, 主要从事超宽带小型化天线设计及研究。



邵金进 (1984—), 男, 湖北人, 现为中国科学院电子学研究所在读博士研究生, 主要从事宽带天线理论及应用研究。



方广有 (1963—), 男, 河南人, 中国科学院电子学研究所副所长, 博士生导师, 主要研究方向为: 超宽带雷达成像理论、方法与技术; 月球与深空探测科学载荷技术; 探地雷达方法与技术; 地球物理电磁勘探方法与技术; 太赫兹成像方法与技术。



纪奕才 (1974—), 男, 山东人, 中国科学院电子学研究所研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为超宽带天线、计算电磁学、超宽带雷达。



张晓娟 (1964—), 女, 山西人, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为: 非均匀媒质电磁散射与逆问题、微波成像新方法及应用、电磁遥感机理、电磁遥感信号处理、电磁遥感系统仿真、天线技术。

(上接第 416 页)

二、征文要求

1. 来稿必须是未曾在国内外公开发表过的文章, 无弄虚作假, 无一稿多投, 不得涉及国家秘密。
2. 论文一般 4—6 页, 以正式论文的形式(包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词、正文、参考文献)书写应征论文。中文论文请包括英文题目、作者、作者单位、摘要和关键词; 英文论文请附上中文题目、作者、作者单位、摘要和关键词。论文摘要应包括目的、方法、结果、结论四部分。

三、论文提交重要时间

- 提交论文截止日期: 2015 年 7 月 10 日
- 通知论文接收日期: 2015 年 8 月 8 日
- 提交论文修改稿日期: 2015 年 8 月 20 日

四、会议论文评奖与发表

1. 年会将对参会论文进行优秀论文评选, 并颁发优秀论文证书。
2. 优秀论文按专业内容分别推荐到《雷达学报》、《电子与信息学报》和《电波科学学报》正刊发表。
3. 其它会议论文以《电波科学学报》增刊形式出版发表。

五、论文提交

会议论文可用两种方式提交:

1. 发送邮件至: radars@mail.ie.ac.cn, 请注明邮件主题为“2015 电波传播学术年会”, 投稿联系人: 贾守新, 电话: 010-58887062
2. 采用网络平台投稿, 请留意中科院电子所网站 <http://www.ie.cas.cn/> 的相关通知。

六、会议联系人

1、会务联系人

贾守新

电话: 010-58887062

通信地址: 北京海淀北四环西路 19 号

邮编: 100190

电子邮件: sxjia@mail.ie.ac.cn

2、中国电子学会电波传播分会联系人

马铁汉

电话: 0373-3713101

通信地址: 河南省新乡市荣校路 195 号

邮编: 453003

电子邮件: mtieh@126.com

第十三届全国电波传播学术年会筹委会

2015 年 1 月 10 日