

利用拖尾能量提高蝶形天线辐射效率*

王建, 黄春琳, 陆珉, 李禹, 粟毅
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:蝶形天线在探地雷达中已有广泛的运用,但其辐射效率不高的问题一直存在。究其原因,主要是将近70%的辐射能量是以有碍目标探测的拖尾的形式存在。为了保证探测性能,传统上可观的拖尾能量往往以阻抗加载的方式被吸收掉。本文研究发现,当选择双极性单周波作为激励脉冲时,通过优化天线长度可以实现拖尾能量的有效利用,从而显著地提高蝶形天线的辐射效率。仿真实验结果表明,在较远的探测距离上本文方法可以将辐射效率提高近100%。通过实测实验进一步验证了本文方法的有效性。此外,本文所提的方法易于工程实现,工程应用价值十分明显。

关键词:探地雷达;蝶形天线;辐射效率;拖尾

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)03-0144-05

Improve the radiation efficiency of bow-tie antenna by exploiting the energy in end reflections

WANG Jian, HUANG Chunlin, LU Min, LI Yu, SU Yi

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The bow-tie antenna, which is widely used in impulse ground penetrating radar (GPR), has very low radiating efficiency. It is because that nearly 70% of the radiated energy exists as the form of end reflection, which is obstructive to probing objects. In order to keep the probing ability, the remarkable energy in end reflections is usually dissipated by resistive loading. Through the current research, it was found that, if the exciting pulse is bipolar and monocycle, the radiation efficiency can be significantly improved by utilizing the energy in end reflection, and the improvement can be implemented by optimizing the antenna length. The simulated results show that the radiation efficiency can be increased by nearly 100%. The measured results validate the proposed method again. Additionally, the proposed method is easy to be carried out in applications and of great use.

Key words: ground penetrating radar (GPR); bow-tie antenna; radiation efficiency; end reflections

蝶形天线由于具有带宽大、几何结构简单等优良特性,被广泛应用于脉冲探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)中^[1],但其脉冲辐射效率低的问题却一直存在,再考虑到GPR的工作环境多是有耗的地下介质,如何提高天线的辐射效率是一个非常具有实际应用价值的问题。

蝶形天线的辐射波形由主脉冲和拖尾(有时也叫做后时振荡)两部分组成^[2-3]。其中,只有主脉冲能用于地下目标的探测,但是主脉冲的能量却不到全部辐射能量的30%^[4]。在脉冲探地雷达中,主脉冲的峰值(即极值点绝对值的最大者)就是衡量天线辐射效率最直接的指标^[5]。拖尾虽然占据了主要的辐射能量,但它的存在会掩盖目标回波,在实际应用中需要被抑制掉,而最有效的抑制方法即是通过阻抗加载吸收掉拖尾^[6],

低的拖尾振荡往往要付出辐射效率低下的代价。为此,一些学者从不同方面提出了提高辐射效率的方法。一类方法是通过改善馈点处的阻抗匹配来增加馈入天线的总体能量,如Maloney^[7], Volkomirskaya^[8]等工作。一类是通过设计优良的电阻加载曲线来降低被吸收的能量,这方面的文献比较多^[3, 5-7, 9-12]。然而,更有吸引力的方法应该是充分利用拖尾中的可观的能量,这方面的研究却非常少见。Lestari^[5, 13]等的成果可以认为属于这一范畴。他们在文献[5]中将天线在加载过程中引入的缝隙所产生的二次辐射与主脉冲叠加,从而实现了辐射效率的提高。此后,这一方法再次被文献[13]用于设计一款改进的蝶形天线。虽然他们用实测数据验证了方法的有效性,但在如何确定二次辐射点的位置上,他们的推导

* 收稿日期:2012-11-27

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:王建(1985—),男,湖南湘潭人,博士研究生,E-mail: wangjian85@yahoo.cn;

粟毅(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: y. su@yeah.net

却存在问题,具体将在下文进一步阐述。

本文根据蝶形天线脉冲辐射的特性,从时域上研究如何利用拖尾来提高辐射效率。研究包括两方面:其一是研究如何选择激励脉冲,使得拖尾不再是被抑制的对象,而是可以有助于辐射效率的提高;其二是如何优化天线的长度来利用拖尾提高辐射效率。最后通过实验与 Lestari 的方法进行对比,以验证本文方法的有效性。

1 蝶形天线简介

1.1 几何结构

研究表明,对于脉冲辐射通常选择圆端蝶形天线而不选择直端的形式^[14]。图1是一圆端蝶形天线几何结构示意图,它由三个参数决定,张角 θ ,馈点间隙长度 g ,以及天线长度 L 。已经证明, θ 主要影响天线的带宽^[15], g 对天线性能的影响较小^[2],而 L 与辐射效率密切相关。本文设定 $\theta = 60^\circ, g = 1\text{mm}$ 。

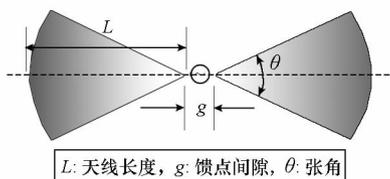


图1 蝶形天线几何结构

Fig. 1 The geometry of bow-tie antenna

1.2 激励脉冲

传统上,考虑到单极性脉冲所含丰富的直流和低频分量很难被天线辐射出去,脉冲 GPR 会选择双极性脉冲作为激励信号,例如如图2所示的高斯微分脉冲:

$$s(t) = 2\pi f_c \sqrt{e} \sqrt{e} (t - t_0) e^{-2\pi^2 f_c^2 (t - t_0)^2}$$

其中 f_c 为中心频率, t_0 为时移因子。而本文随后将论述双极性激励脉冲对于辐射效率提高的意义。

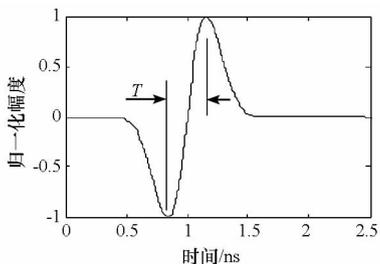


图2 高斯微分脉冲

Fig. 2 The first derivative of the Gaussian pulse

2 辐射效率的提高

2.1 辐射特性分析

蝶形天线在空间的辐射波形主要是由馈点的

辐射与末端的辐射叠加而成^[2]。其中馈点辐射部分即为主脉冲,而拖尾主要是由末端辐射引起的。图3显示了天线正前方辐射波形的空间组成,其中 d 是天线正前方的探测深度。由于在探地雷达应用中最关心的辐射方向为天线的正前方,因此本文主要研究这个方向的辐射效率问题。

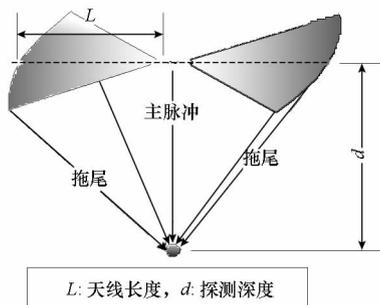


图3 辐射脉冲的空间组成

Fig. 3 Radiation composition in space

当天线足够长后,主脉冲和拖尾就能在时间上分离开来,图4举例说明了一长度为 $L = 30\text{cm}$ 的蝶形天线在不同探测深度的辐射波形。其中,激励脉冲为 $f_c = 1\text{GHz}$ 的高斯微分脉冲,辐射脉冲的幅度用主脉冲的峰值做了归一化处理。由图可知,主脉冲与拖尾的波形其实非常相似,但二者的相位却是相反的,这是由于天线上的表面电流在末端反射时会发生相位的翻转。此外,随着探测深度的增加,拖尾所占的辐射能量越来越大,超过一定深度后,拖尾的幅度就会高于主脉冲。显然,如果拖尾能被有效利用而不是被吸收掉,那么辐射效率的提高是很可观的。

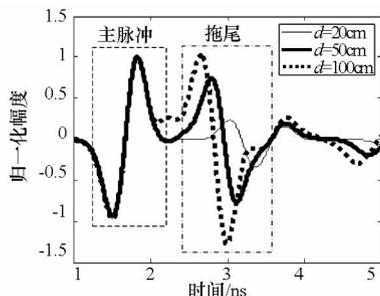


图4 辐射脉冲波形

Fig. 4 Radiated pulse

2.2 拖尾能量的利用

从图4还可以注意到,主脉冲与拖尾相位的相反导致主脉冲的第二个极值点与拖尾的第一个极值点总是同向的。这两个极值点的时间间隔则是由电流从馈点流向天线末端所需时间,以及馈点辐射与末端辐射在空间的波程差共同决定的。这就意味着,对于空间的某一位置,存在一个最优的天线长度 L_0 ,使得主脉冲的第二个极值点与拖尾的第

一个极值点在同一时间出现。此时将会叠加产生一个具有增强极值点的脉冲,从而实现辐射效率的提高。不失一般性,只要激励脉冲是类似高斯微分脉冲(如图 2 所示)那样的双极性单周波,最优天线长度就一直存在。这也是本文除了传统观点外选择双极性激励脉冲的另一个原因。

根据图 3 所示的空间几何关系可知,在天线正前方的探测深度 d 处的最佳天线长度满足

$$\frac{\sqrt{d^2 + L_o^2} - d + L_o}{c} = T$$

其中 c 为自由空间中的光速, T 为双极性单周激励脉冲正负极之间的时间间隔,如图 2 所示。从而

$$L_o = \frac{cT(2d + cT)}{2(d + cT)}$$

虽然 L_o 与探测距离 d 有关,但当 $d \gg cT$ 时, $L_o \approx cT \triangleq L'_o$ 。

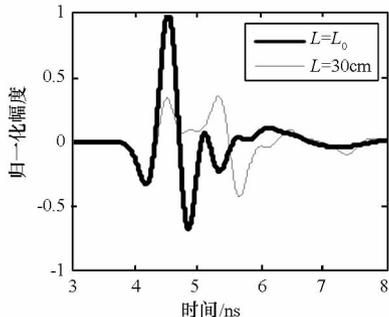
3 实验结果与分析

3.1 仿真实验

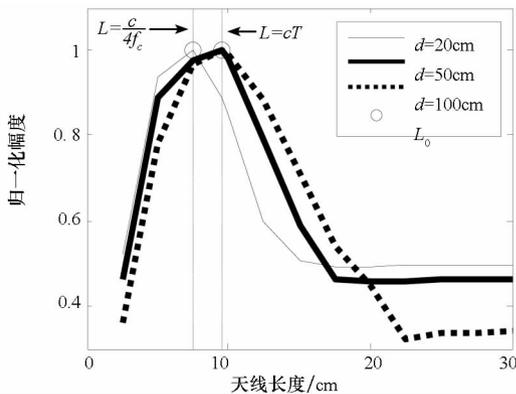
本文首先用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)算法进行仿真实验来验证方法的有效性。在仿真中激励脉冲为中心频率 $f_c = 1\text{GHz}$ 的高斯微分脉冲。图 5(a) 比较了拥有最佳长度的天线与一长度为 30cm 的天线在 $d = 100\text{cm}$ 处的辐射波形。可以看出,天线在最优化长度下叠加产生的脉冲的峰值得到了明显的增强。我们不妨将具有增强峰值的叠加脉冲重新定义为主脉冲,并将其用于目标的探测,而将剩下的辐射部分定义为拖尾。主脉冲峰值的增强意味着辐射效率的提高,同时在馈入天线能量一定的前提下,也意味着拖尾水平的降低。这两方面将直接提高 GPR 探测目标的能力。然而,一个不可避免的事实是,新定义的主脉冲相对于原来的主脉冲而言,会发生脉冲宽度上的扩展。这样一来,辐射脉冲就不能符合既定的频段要求。其实,这个问题可以在产生激励脉冲时得到很好的解决。新的主脉冲宽度大约是激励脉冲宽度的 $3/2$,那么只要将激励脉冲的宽度调整为原来的 $2/3$ 即可满足频段的要求。而这种激励脉冲宽度上的调整,一般不会给整个系统带来额外的开销。尤其在低频应用中,探测深度是很重要的性能指标,这时候天线的辐射效率就非常关键,而此时产生一个比原来窄 $1/3$ 的激励脉冲几乎不会带来任何的代价。

图 5(b) 进一步说明了主脉冲峰值与天线长度的关系。由图可知,在不同探测深度,当蝶形天

线具有最佳天线长度时,辐射脉冲具有最强的峰值,也就是最强的辐射效率。在同一探测深度,相比长度大于 20cm 的天线,用本文的方法可以使得辐射效率提高将近 100%。当探测距离大于 20cm 后,图 5(b) 也表明最佳天线长度趋于 cT 。对于高斯微分脉冲,有 $T = 1/(\pi f_c)$ 。



(a) $d = 100\text{cm}$ 处的辐射波形



(b) 辐射效率与天线长度的关系

图 5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

此外,图 5(b) 还标出了用 Lestari^[5] 的方法计算出的最佳天线长度 $L_L = c/(4f_c)$ 。用两种方法得到的长度比较近似,因而得到的辐射效率也相差不多,本文的方法性能稍好。但当探测距离较近时, Lestari 的长度要好于本文的近似值 $L'_o = cT$,这是因为此时 L_L 比 L'_o 更接近 L_o 。然而, Lestari 在推导 L_L 时却存在两个明显的问题。首先,他是从频域上以优化激励脉冲中心频率的辐射来等效整个激励脉冲辐射的优化,虽然激励脉冲中心频率处的能量最强,但激励脉冲都是超宽带的,蝶形天线是典型的时域天线,这样的等效缺乏说服力。再者,关于如何在中心频率上实现天线馈点与末端辐射的叠加这个关键点上,论文却阐述得过于简单和模糊,很难让读者理解。本文则是严格地从时域出发,直接优化整个激励脉冲的辐射,因而其结论更可靠。

通常蝶形天线是单面印刷在基底上面。但是只要基底的介电常数不是特别大,基底不是特别厚,那么基底对天线上电流的速度影响很小,从而

不会对天线尺寸有明显的影[2]。这与平常见到的印刷在基底上的共面波导不一样,基底对波导的影响非常大。

在 GPR 的实际应用中,当天线靠近地面工作时,有耗地下介质会影响天线的性能。但实验发现,当天线的地面高度超过 1cm 后,地下介质对天线上的电流速度影响很小,可以忽略。但此时最佳天线长度的计算需要考虑到介质介电常数。假设地下介质介电常数值为 ϵ_r ,那么介质中的 d 处的最佳尺寸为

$$L_o = \frac{\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{d^2 + c^2 T^2} + 2dcT \sqrt{\epsilon_r} - cT - d\sqrt{\epsilon_r}}{\epsilon_r - 1}$$

此时最佳天线长度与探测距离和介电常数均相关。

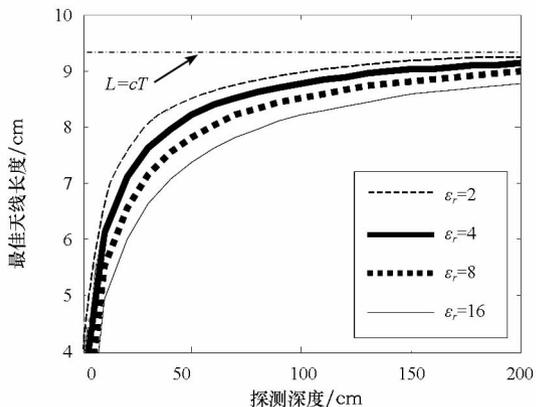


图6 地下介质中的最佳天线尺寸

Fig.6 Optimal antenna length under ground

图6列举了4种地下介质中不同探测深度上的最佳天线尺寸,其中,天线高度为2cm。从图中可以获知,介质介电常数越大,最佳天线长度越小。在实际应用中,可以根据地下介质的介电常数以及最感兴趣的探测深度等先验知识有针对性地优化天线的辐射效率。同样,当探测深度增大时,最佳天线长度也将趋于 cT ,这个长度也可以作为先验知识缺乏的情况下的最佳天线长度。

3.2 实测实验

为了进行实测实验,我们制作了4种不同长度的蝶形天线,天线的编号以及对应的尺寸如图7所示。其中,II号和III号天线分别对应Lestari和本文给出的尺寸。每种天线都制作了2个,分别用于收发信号。4种天线的张角均为60°,馈点间隙均为1mm。待测天线分别挂载在Radar Eye系统中完成对比试验。Radar Eye是由国防科大研制的脉冲体制GPR,采用收发分置天线,主要由主机和天线两大部件组成,如图8所示。激励脉冲为准高斯微分脉冲, T 约为0.35ns, f_c 约为0.9GHz。

实验场景如图9所示,利用Radar Eye穿透1块厚60cm的大理石碑,通过测量大理石—空气界面的反射回波强度来比较待测天线的辐射效率。测量结果以直方图的形式显示在图10中。从结果可以看出,蝶形天线用Lestari以及本文的方法优化长度后,其辐射效率要明显高于未优化时的状态。但是,对比图5与图10却发现实际测量时辐射效率的提高并不如仿真实验中那么明显。这主要是由于实验系统与待测天线之间存在阻抗匹配等问题,从而不能保证每次测量的实验条件都和仿真实验一样保持恒定。

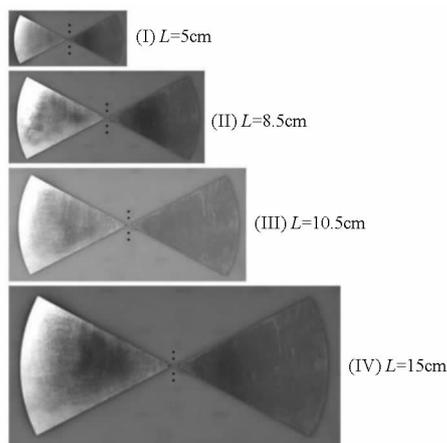


图7 待测天线

Fig.7 Antennas under test

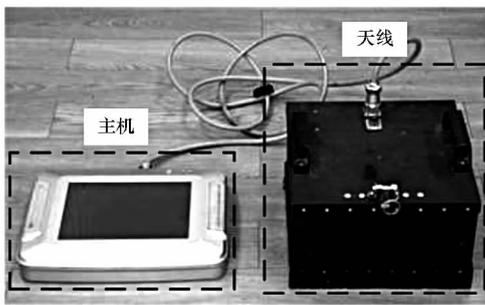


图8 实验系统:Radar Eye

Fig.8 Experimental system: Radar Eye

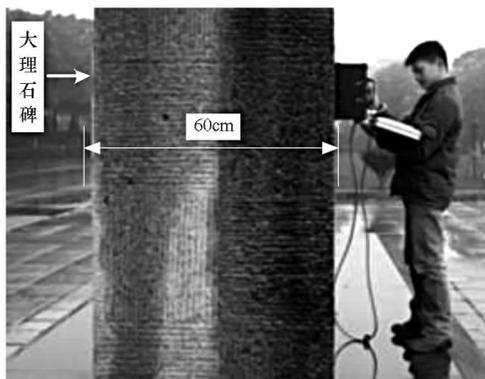


图9 实验场景

Fig.9 Experimental scene

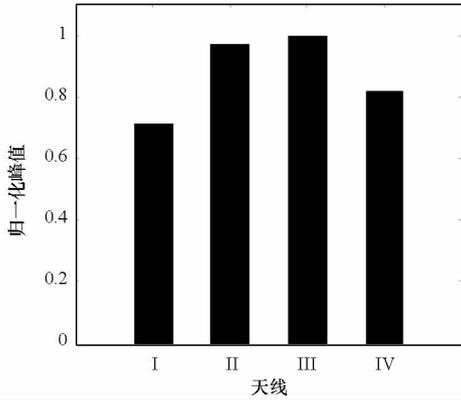


图 10 回波强度测量结果

Fig. 10 Measured results of reflection

4 结论

在蝶形天线的辐射能量中,将近 70% 的能量是以拖尾的形式存在的。为了抑制拖尾对于目标探测的不利影响,拖尾通常被加载阻抗吸收,这也直接造成了辐射效率低的事实。本文通过选择合适的激励脉冲,以及优化天线尺寸,将拖尾的能量用于辐射效率的提高。仿真和实测实验验证了本文方法的有效性。本文的方法很容易工程实现,其工程应用价值十分明显。尤其对于低频 GPR 应用,此时天线的辐射效率更加关键,本文研究成果的价值更为突出。

参考文献 (References)

- [1] 粟毅,黄春琳,雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
SU Yi, HUANG Chunlin, LEI Wentai. Theory and applications of ground penetrating radar[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [2] Volakis J L. Antenna engineering handbook [M]. 4ed. McGraw-Hill, 2007.
- [3] 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.
- [4] Maloney J G, Smith G S. A study of transient radiation from the

Wu-King resistive monopole-FDTD analysis and experimental measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(5): 668-676.

- [5] Lestari A A, Yarovoy A G, Lighthart L P. RC-loaded bow-tie antenna for improved pulse radiation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(10): 2555-2563.
- [6] Wu T T, King R W P. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13: 369-373.
- [7] Maloney J G, Smith G S. Optimization of a conical antenna for pulse radiation; An efficient design using resistive loading[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(7): 940-947.
- [8] Volkomirskaya L, Varenkov V, Reznikov A, et al. Experimental investigation of the dependence of transmitter power and antenna efficiency at a deep GPR studies [C]//6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), Sevastopol, 2012: 117-119.
- [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] Montoya T P, Smith G S. A study of pulse radiation from several broad-band loaded monopoles[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(8): 1172-1182.
- [11] 周蔚红,刘培国,何建国. 一种近地面工作时域天线特性分析[J]. 国防科技大学学报, 2005, 1: 45-70.
ZHOU Weihong, LIU Peiguo, HE Jianguo. Analysis of the time-domain antenna operating adjacent to the ground [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 1: 45-70. (in Chinese)
- [12] Shao J J, Chen C, Chen J, et al. Study of UWB half-ellipse antenna with a shallow backed cavity in vital sign detection [C]// Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, Shanghai, 2012: 95-98.
- [13] Lestari A A, Bharata E, Suksmono A B, et al. A modified bow-tie antenna for improved pulse radiation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7): 2184-2192.
- [14] Lestari A A, Yarovoy A G, Lighthart L P. Numerical and experimental analysis of circular-end wire bow-tie antennas over a lossy ground[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(1): 26-35.
- [15] Carrel R L. The characteristic impedance of two infinite cones of arbitrary cross section[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1958, 6: 197-201.