

# 钻孔雷达定向天线仿真与设计

赵青<sup>1</sup>, 邓祥开<sup>2</sup>, 常兴浩<sup>3</sup>, 赵悻哲<sup>1</sup>, 唐剑明<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054; 2. 中国石化西南石油工程有限公司测井分公司 成都 610100;  
3. 中国石化华北石油工程公司 郑州 450006)

**【摘要】**采用分布介质加载和集中电阻加载宽带小型化技术,设计了一个四方向的定向天线。天线中心频率处方向图前瓣增益比后瓣增益大28 dB,天线主瓣增益为5.4 dB,天线辐射的前向与后向时域脉冲波形峰值之比大于3,时域电场脉冲波形拖尾小于主峰幅度1/5。通过全向、定向钻孔雷达天线进行联合仿真,结果表明天线定向效果明显。为了验证天线性能,实际加工制作了仿真的天线,并进行测试,测试得到的天线 $S_{11}$ 与仿真结果吻合。

**关键词** 钻孔雷达; 定向天线; 介质加载; 小型化; 电阻加载

中图分类号 TN95

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.010

## Simulation and Design of Directional Antenna in Borehole Radar

ZHAO Qing<sup>1</sup>, DENG Xiang-kai<sup>2</sup>, CHANG Xing-hao<sup>3</sup>, ZHAO Yi-zhe<sup>1</sup>, and TANG Jian-ming<sup>1</sup>

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. China Petrochemical Southwest Well Logging Company Chengdu 610100;

3. China Petrochemical North China Petroleum Engineering Company Zhengzhou 450006)

**Abstract** A directional antenna of four directions is designed based on the broadband miniaturization technology of distribution medium load and concentrated resistance load. The gain of antenna main lobe is 5.4 dB and in the center frequency the gain of anterior lobe is 28 dB larger than the back lobe. The ratio of the peak-to-peak value of forward time-domain radiation pulse to backward time-domain radiation pulse is greater than 3. The trailing of time domain radiation pulse waveform is less than one fifth of main peak amplitude. The joint simulation of both omni-directional and directional borehole radar antennas shows that the directionality of the designed antenna is improved. The antenna is fabricated to make the test and the measured results of the antenna's  $S_{11}$  are consistent with the simulation results.

**Key words** borehole radar; directional antenna; medium load; miniaturization; resistance load

常规钻孔雷达使用全向天线辐射和接收,无法对地质目标进行精确定位。单孔探测的定向钻孔雷达<sup>[1-3]</sup>有两种实现方式:1)采用阵列天线接收,再通过信号处理提取反射体的方位信息;2)采用单个定向接收天线的方式,反射体在定向天线的接收方向,通过信号处理提取反射体的方位信息。

对单个定向天线<sup>[4]</sup>而言,主要手段是依靠金属反射、引向和吸波材料吸收。采用反射板或者引向器至少需要距离天线1/4波长,对于工作在米波的天线来说,钻孔的直径远远不够。最常见的处理方法是在天线周围填充高介电常数或者高磁导率物

质<sup>[5-6]</sup>。铁氧体等吸波材料应用在低频段的国内少见报道,国外虽有报道但限于形态上差异不能很好的应用到天线设计中,其在频段内吸波性能与对各频率吸收差异性也有待完善<sup>[7]</sup>。大多数单个定向雷达天线没有考虑波形尾部振荡。少数天线考虑尾部振荡却没有得到明显的主峰副峰比。采用单个定向天线接收易于操作,且对传输、接收机系统要求不高。但是需要天线系统作机械旋转,易发生故障,且定位精度不高等因素制约。阵列天线接收技术由于定位精确得到广泛发展。

本文采用分布介质加载和集中电阻加载宽带小

收稿日期: 2013-07-11; 修回日期: 2014-05-15

基金项目: 国家863项目(2013AA064603); 四川省科技厅应用基础项目(2013JY0003)

作者简介: 赵青(1964-),男,博士,主要从事雷达测井和电波传播等方面的研究。

型化技术,设计了一个四方向的定向天线,天线指标满足钻孔雷达设计要求且具有良好的定向效果。

## 1 定向天线结构

天线由4个偶极子及其对应的4个反射面构成,使用了分布介质加载和集中电阻加载宽带小型化技术。介质加载就是在天线与反射板之间填充相对介电常数较高材料。电磁波在相对介电常数 $\epsilon_r$ 和相对导磁率 $\mu_r$ 的介质中传播时,如铁氧体或介质,其波长缩短了 $\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ 倍,而天线谐振长度取决于其所处介质中的波长。应用该原理可以将介质填充在天线周围来实现小型化。本文采用介电常数为8的大理石进行填充。

每个偶极子天线通过集中电阻加载来改变原来的电流分布、改善天线端口的反射系数、方向图、增益及带宽。为了选择合适的电阻分布进行加载,需要分析和计算不同的加载方式。Wu-King加载和正切加载<sup>[8-10]</sup>的阻抗公式分别为:

$$Z^i(z) = \frac{60\psi}{h-|z|} \quad (1)$$

$$Z^i(z) = c \tan\left(\frac{\pi z}{2h}\right) \quad (2)$$

式中, $h$ 为天线臂长; $\psi$ 和 $c$ 为加载常数。分别采用这两种加载方式进行仿真计算,研究加载常数不同时对偶极天线的 $S$ 参数的影响。在石灰岩环境中,尝试大量 $c$ 、 $\psi$ 参数基础上再对电阻值进行微调仿真,最终得到一组加载电阻值,使天线性能达到较理想的状态。

每个偶极子单臂集中加载电阻为7个,从馈电点到天线末端加载电阻值分别为1、4、12、36、100、300、800  $\Omega$ 。偶极子结构为单臂7个天线节,每个长50 mm、半径3 mm,天线头也采用了锥形结构。4个偶极子天线使用塑料管封装后置于相对介电常数为8的填充材料中,填充材料选取为大理石,其外直径66 mm。天线中间留有一个空心金属圆柱,内径7 mm,厚1 mm,为馈电线留下空间。4片矩形金属反射板为十字交叉结构,厚度为1 mm。天线长度、反射板和填充介质高度都为830 mm。天线结构如图1所示,整个天线由厚度10 mm玻璃钢封装后外径为86 mm,可以工作在直径89 mm的钻孔中。

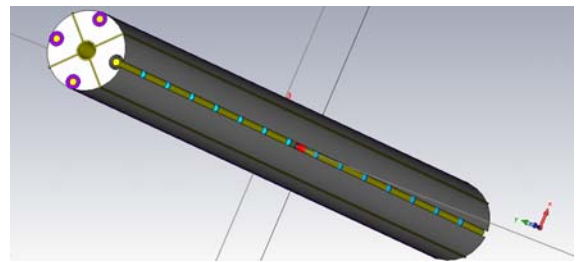


图1 定向天线结构

## 2 定向天线仿真结果

使用电磁仿真软件将天线置于相对介电常数为8的岩石环境仿真。对4个偶极子天线中的一个进行激励,并在该偶极子前后及侧旁设置时域探针来监视空间某些点时域电场波形。仿真得到岩石环境中天线 $S_{11}$ 如图2所示, $S_{11}$ 小于-5 dB频带为75~300 MHz,谐振频率点在118 MHz。

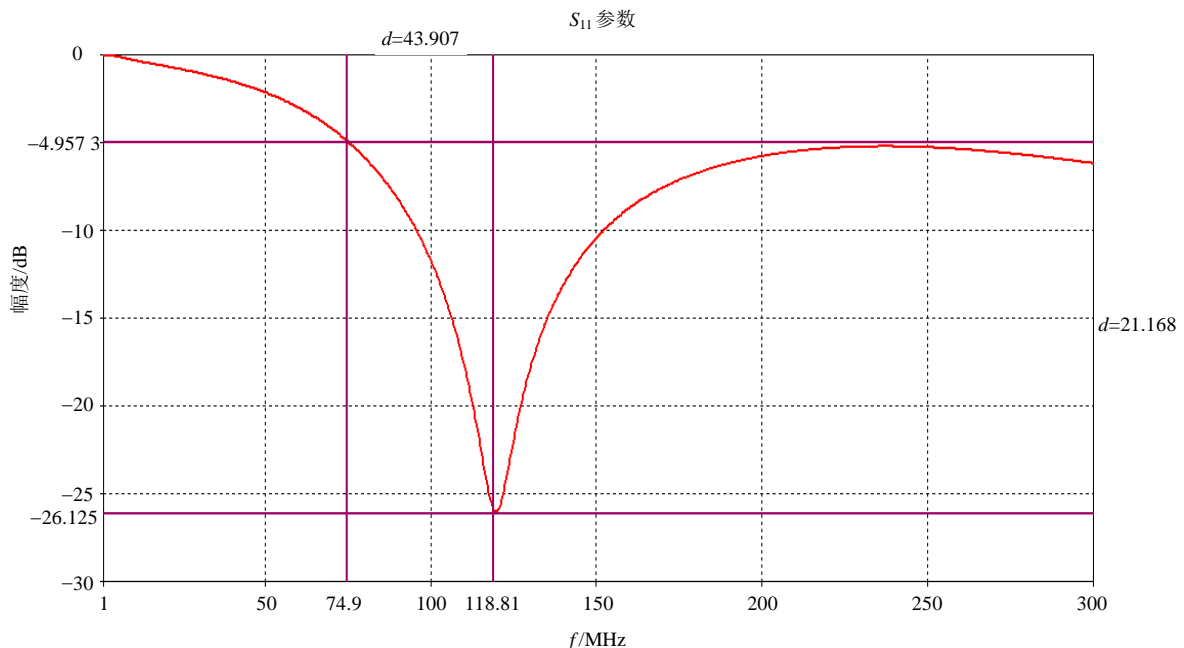


图2 定向天线岩石环境仿真 $S_{11}$ 曲线

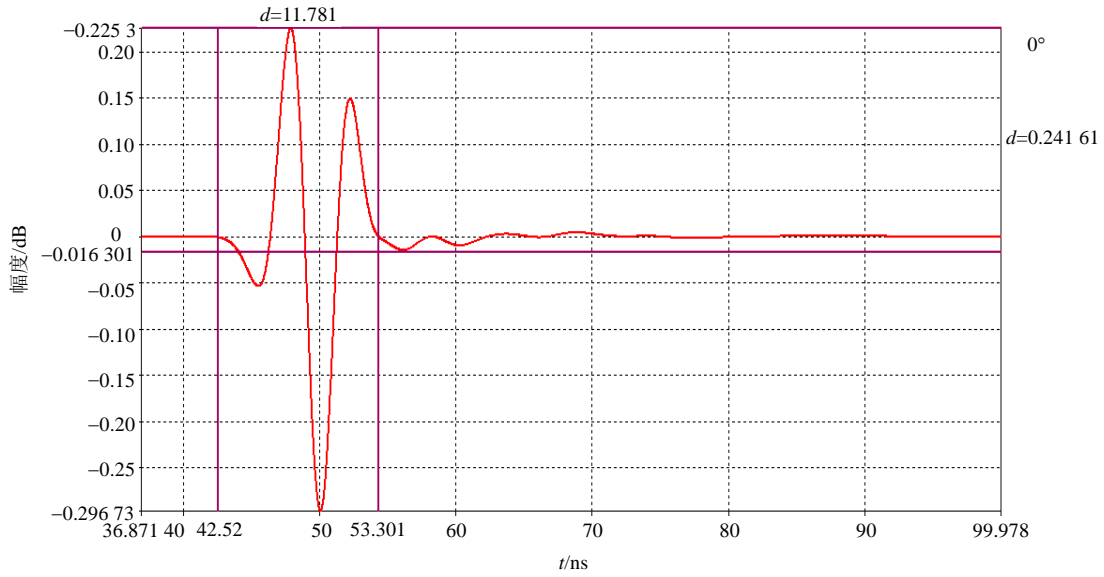


图3 定向天线岩石环境仿真前向辐射波形

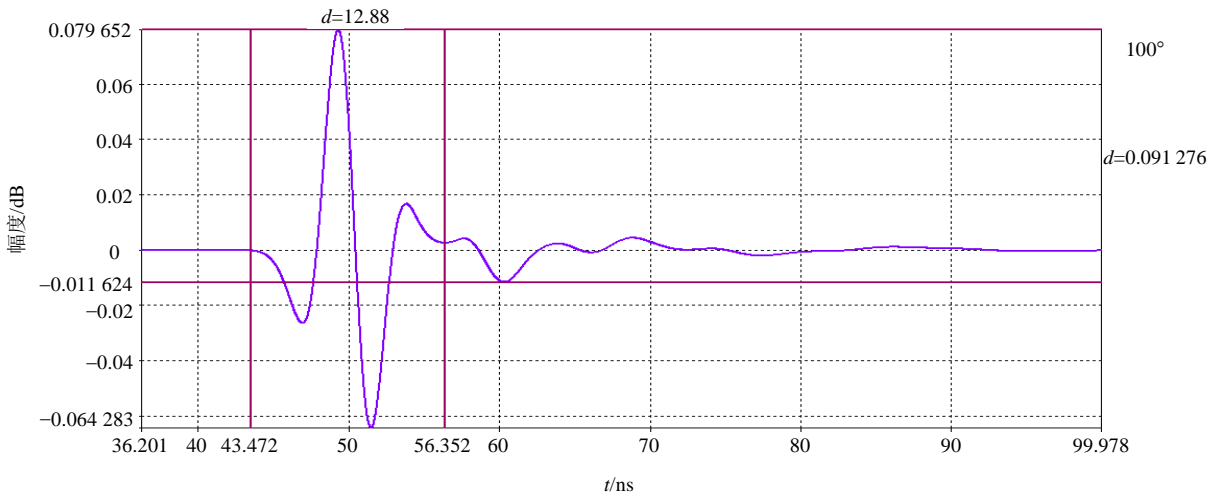


图4 定向天线岩石环境仿真后向辐射波形

仿真得到前向辐射波形如图3所示, 其峰峰(主峰-副峰)值为0.52 V/m, 其中主峰值0.30 V/m, 负峰值0.23 V/m。后向电场波形如图4所示, 其峰峰(主峰-副峰)值为0.14 V/m, 其中主峰值0.08 V/m, 负峰值0.06 V/m。天线辐射的前向后向电场波形峰峰值之比为3.63。前向电场波形拖尾很小, 仅为0.02 V/m, 远小于主峰值0.30 V/m的1/5。后向电场波形拖尾稍大, 为0.01 V/m, 仍小于主峰值0.08 V/m的1/5。仿真得到了天线在频率120 MHz的E方向图如图5所示, 其主瓣增益为5.4 dB, 后瓣增益-22.6 dB, 前向比后向增益大28 dB, E面半功率波瓣宽度为72.5°。仿真结果满足钻孔雷达定向天线设计要求。

为了验证定向天线的实际效果, 将设计的定向天线同全向天线做协同仿真, 其中定向天线为接收天线, 全向偶极子天线为发射天线。激励脉冲及仿

真岩石环境不变, 收发一体模型示意图6所示。收发天线端面相距1 m, 距离天线5 m处设置金属反射板, 反射板宽1 m、高2 m。通过仿真计算, 定向天线4个端口接收到的信号波形如图7所示, 其中前面波形为收发天线之间的直耦波, 而后部分波形为经过金属反射板的反射波。定向天线正面偶极子天线接收到的反射板反射信号如图8所示, 其反射波信号峰峰值为0.008 5 V, 背面偶极子天线接收到的反射板反射信号如图9所示, 其反射波信号峰峰值为0.002 8 V, 二者之比为3.05。而左右两边偶极子天线接收到的反射波信号峰峰值介于正面和背面天线接收反射波信号峰峰值之间, 并且相等。从而可以根据4个端口反射波信号幅度初步判断反射物所在方位, 该仿真验证了全向天线发射定向天线接收的钻孔雷达系统对目标物定位原理。

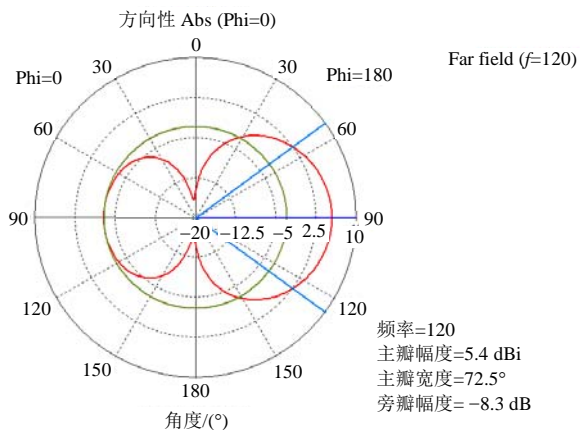


图5 定向天线岩石环境仿真E面方向图

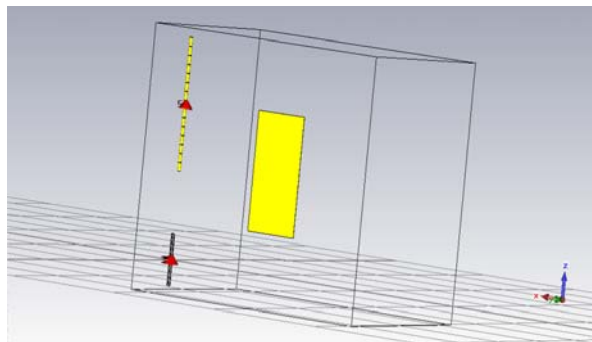


图6 全向天线发射定向天线接收一体模型示意图

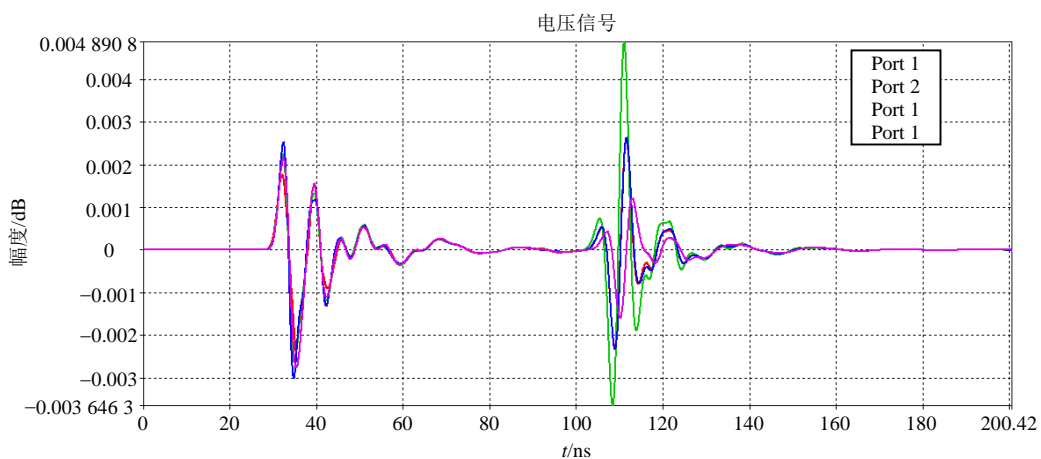


图7 定向天线4个接收端口信号

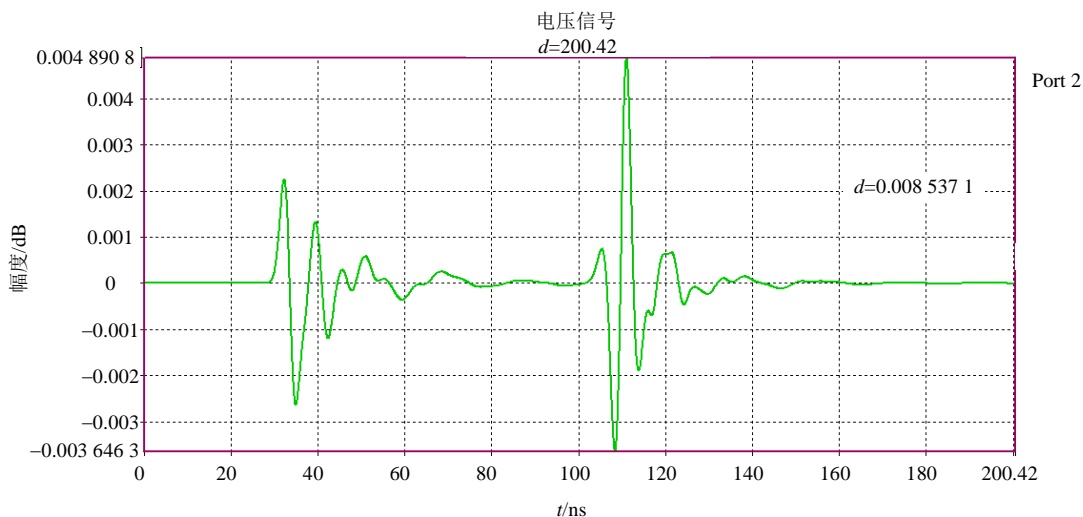


图8 定向天线面对反射板端口接收信号

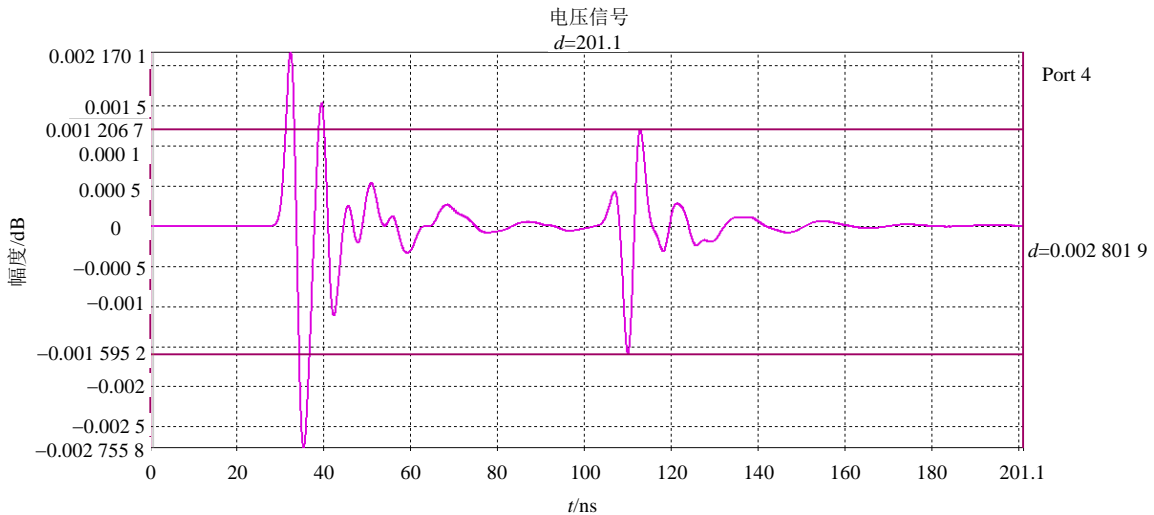


图9 定向天线背对反射板端口接收信号

### 3 钻孔雷达天线加工测试



图10 钻孔雷达定向天线实物图

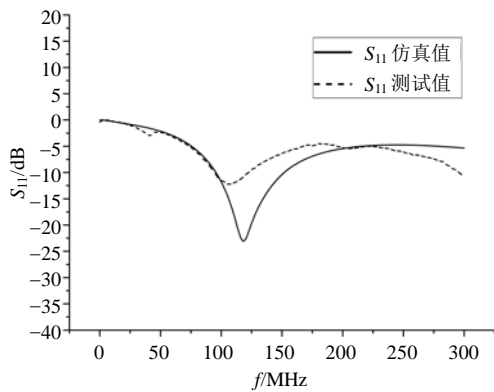


图11 定向天线空气中仿真与测试 $S_{11}$ 曲线比较

为了验证天线性能, 依据仿真结果设计并加工定向天线并进行测试。天线实物图如图 10 所示, 将天线在空气中仿真得到  $S_{11}$  值与测试值进行了比较, 如图 11 所示。总体上仿真结果与测试结果  $S_{11}$  曲线走向趋势一致,  $S_{11}$  仿真值与测试值在低频段(谐振点之前频段)十分吻合, 而在高频段(谐振点之后频段)仿真  $S_{11}$  值比测试值前段要小, 后段稍大。天线谐振

点仿真值在 117 MHz, 而测试值在 109 MHz, 相差 8 MHz。仿真与测试之间差别与加工装配精度、馈电点焊接工艺及测试环境有一定的关系。

### 4 结论

常规钻孔雷达使用全向天线辐射和接收, 无法对地质目标进行精确定位。本文采用分布介质加载和集中电阻加载宽带小型化技术, 设计了一个四方向的定向天线。天线中心频率处方向图前瓣增益比后瓣增益大 28 dB, 天线主瓣增益为 5.4 dB, 天线辐射的前向与后向时域脉冲波形峰峰值之比大于 3, 时域电场脉冲波形拖尾小于主峰幅度 1/5。通过全向、定向钻孔雷达天线进行联合仿真, 结果显示天线的定向效果明显, 可以根据 4 个端口反射波信号幅度来判断反射物所在方位。并对设计的定向天线进行加工及测试, 测试得到的天线  $S_{11}$  与仿真结果吻合, 表明该方法是可行的。

### 参 考 文 献

- [1] SATOSHI E, MOTOYUKI S, HIROAKI N. Super-resolution of coherent targets by a directional borehole radar[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2000, 38(4): 1725-1732.
- [2] LARS F. Theory of a directional borehole antenna[C]// Geosciences and Remote Sensing Symposium. Firenze: IEEE, 1995: 1714-1716.
- [3] FLACHENECKER G, BROSE J. Active receiving antenna for borehole radar measurements[C]// Geosciences and Remote Sensing Symposium. Vancouver: IEEE, 1989: 2870-2873.
- [4] CHEN Yong-hua. FDTD modeling and analysis of a broadband antenna suitable for oil-field imaging while drilling[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2002, 40(2): 434-442.

(下转第716页)