

# 钻井液环境无线传输微型 PIFA 共形天线研制<sup>\*</sup>

夏文鹤<sup>1</sup> 邓力浩川<sup>1</sup> 官文婷<sup>2</sup> 过方舟<sup>1</sup> 陈一健<sup>3</sup>

(1. 西南石油大学电气信息学院 成都 610500; 2. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院 成都 610050;  
3. 西南石油大学石油与天然气工程学院 成都 610500)

**摘要:**井下返式微球测量仪需在钻井液环境中实现无线数据传输功能,其直径一般不超过10 mm,该参数限制了无线收发结构的尺寸,同时,传统天线大多采用低损耗板材,不利于大批量应用。针对上述问题,提出了辐射贴片弯折与地平面开槽的方法对传统PIFA天线进行改进,天线平面尺寸仅为17 mm×8.4 mm×0.049 mm,较类似天线的设计缩小了68.3%;天线通过柔性印刷电路技术制造,弯曲175°后安装在微球测量仪表面。天线在相对介电常数为81、电导率为1.258 S/m的钻井液中测得的谐振点频率为310 MHz,对应回波损耗为-32.4 dB, -20 dB带宽为35 MHz。天线在相对介电常数和电导率不同的钻井液中,均具有较为理想的全向辐射特性。相比其他天线,所提出的天线在尺寸、谐振点频率和回波损耗等性能指标上均具有一定的先进性。综上,所提出的天线可用于微球测量仪在钻井液环境中的无线通信,使原有微球测量仪的数据传输方式由有线通信变为了无线通信,降低了井下测量短节的设计难度,提升了数据传输的时效性。

**关键词:**PIFA;辐射贴片弯折;地平面开槽;柔性印刷电路;井下微球测量仪

中图分类号: TN2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.6040

## Development of micro PIFA conformal antenna for wireless transmission in drilling fluid environment

Xia Wenhe<sup>1</sup> Deng Lihaochuan<sup>1</sup> Guan Wenting<sup>2</sup> Guo Fangzhou<sup>1</sup> Chen Yijian<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;  
2. Engineering Technology Research Institute, Petrochina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610050, China;  
3. School of Petroleum and Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** The downhole upwelling microsphere measuring instrument needs to realize wireless data transmission function in drilling fluid environment, and its diameter is generally not more than 10 mm, which limits the size of wireless transceiver structure. At the same time, traditional antennas mostly use low-loss plates, which is not conducive to large-scale applications. To solve the above problems, this paper proposes the method of bending the radiation patch and grooving the ground plane to improve the traditional PIFA antenna. The plane size of the antenna is only 17 mm×8.4 mm×0.049 mm, which is 68.3% smaller than that of similar antenna designs. The antenna is manufactured by flexible printed circuit technology, bent at 175° and mounted on the microsphere measuring instrument surface. The resonant point frequency measured by the antenna in the drilling fluid with relative dielectric constant of 81 and conductivity of 1.258 S/m is 310 MHz, corresponding return loss is -32.4 dB, and the bandwidth of -20 dB is 35 MHz. The antenna has ideal omnidirectional radiation characteristics in drilling fluids with different relative dielectric constant and conductivity. Compared with the antennas proposed in other literatures, the antennas proposed in this paper are advanced in dimensions, resonant frequency and return loss. In summary, the antenna proposed in this paper can be used for wireless communication of the microsphere measuring instrument in the drilling fluid environment, which changes the data transmission mode of the original microsphere measuring instrument from wired communication to wireless communication, reduces the difficulty of designing the downhole measuring sub, and improves the timeliness of data transmission.

**Keywords:** PIFA; radiation patch bent; ground plane slotting; flexible printed circuit; downhole microsphere measuring instrument

收稿日期:2024-07-18

\* 基金项目:国家重点研发项目(2023YFB3210205)资助

## 0 引言

随钻测量技术(measurement while drilling, MWD)可以在钻头钻进的同时监测一系列的工程参数以控制井眼轨迹<sup>[1]</sup>,按照信号传输方式可分为有线传输和无线传输。无线传输主要有3种方式,分别为泥浆脉冲、电磁波和应力波信号传输。其中电磁波传输方式通过在地层中激发高频电磁波信号,即将地层作为电磁波信号的传输通道,实现井下数据传输,具有一定的应用前景。但是电磁波传输方式极易受到地层特性的影响,尤其在低电阻率地层,由于过大的层间电流,导致信号出现严重衰减,使有效测量深度受到严重制约<sup>[2-5]</sup>。

微球测量仪是油气井筒内测量技术的重要组成部分,有望解决复杂深井井筒流动参数测量难题,已在多口井上开展实验<sup>[6-10]</sup>。目前,微球测量仪在井下采用有线方式写入数据,上返地面后需从管汇中滤出,才能读取数据,时效性较差。为了提高微球测量仪的数据交互效率,将无线通信技术引入其中,而天线设计是亟待解决的关键技术。微球测量仪工作在钻井液环境中,钻井液是一种高介电常数和高电导率的介质,会导致天线性能恶化,如谐振点偏移和增益下降等。此外,微球尺寸通常不超过10 mm<sup>[6]</sup>,上述因素均对天线设计提出了挑战。

为了使天线能够在高介电常数、高电导率的环境中工作,众多天线被提出。Miah等<sup>[11]</sup>提出了一种超宽带环路天线,−10 dB带宽为309~1 104 MHz;Yousaf等<sup>[12]</sup>提出了一种共形天线,能够覆盖MedRadio(401~406 MHz),ISM(433.1~434.8 MHz,868~868.6 MHz,902~928 MHz)和中场(1 200 MHz)频段;Das等<sup>[13]</sup>提出了一种高带宽圆极化共形天线,工作频率位于ISM频段的915 MHz,体积仅有66.7 mm<sup>3</sup>。虽可用于介电常数和电导率相对较高的生物组织环境,但天线平面尺寸均大于10 mm×15 mm,无法应用于微球测量仪中。此外,上述天线能否在介电常数与电导率更高的钻井液中工作,有待进一步研究和论证。

平面倒F天线(planar inverted F antenna, PIFA)尺寸小、结构简单,具有优秀的比吸收率特性和全向性,广泛用于手机和可穿戴设备<sup>[14]</sup>。为了优化PIFA天线尺寸, Lee等<sup>[15]</sup>提出利用高介电常数基板来缩小天线尺寸,但该方法将导致基板变得十分厚重且价格昂贵;Osman等<sup>[16]</sup>在柔性Rogers 5880基板上设计了可重构PIFA天线,验证了PIFA天线在高介电常数、高电导率环境中工作的可行性,同时对辐射贴片进行弯折,缩小了天线尺寸,天线平面尺寸为15 mm×27 mm;陈蓬旭<sup>[17]</sup>在微带PIFA天线的中央零场强处加入了金属墙,使天线尺寸缩小了一半;刘路路等<sup>[18]</sup>在0.4 mm厚FR4基板上对微带天线的地平面进行开槽,从而改善了辐射贴片的表面电流分布,等效增加了天线的电尺寸,从而缩小了天线的物理尺寸。文献[15,17]虽能够缩小天线尺寸,但将导致天线立体结构发生变化,无法用于微球测量仪中;文献[16,18]所提出的

辐射贴片弯折和地平面开槽方法可以在只改变天线平面结构的条件下,缩小天线尺寸,具有一定的参考价值。本文所提出的天线同时利用了辐射贴片弯折和地平面开槽这两种现有方法,对PIFA天线的尺寸进行改进,使其能够应用于微球测量仪中。

## 1 微球测量工艺及天线设计思路

新型近钻头数据采集装置在钻进过程中,将采集的信息通过无线方式写入井下微球存储释放短节中待释放的微球测量仪,随后井下微球存储释放短节释放微球测量仪。微球测量仪在钻井液的携带下,沿环空返回地表的过程中,利用携带的传感器对环空参数进行采集。微球测量仪返出地表后,地面管汇内接收装置通过无线方式将微球测量仪内部数据读出后传输到现场监测站,如图1所示。

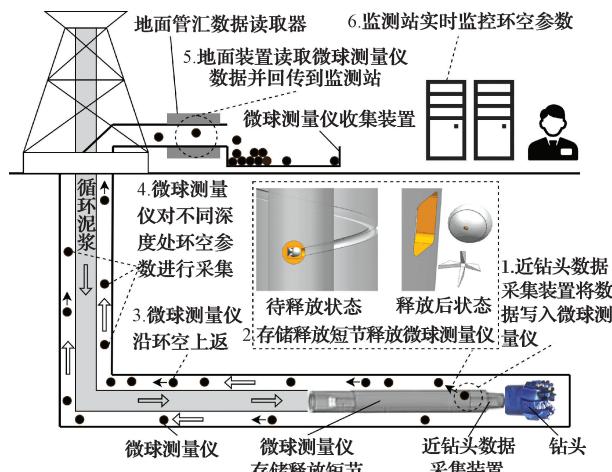


图1 微球测量仪工作流程

Fig. 1 Microsphere measuring instrument working flow chart

该技术思路需在钻井液环境中实现高频电磁波传输,而钻井液往往是具有高电导率特性的有损介质,电磁波穿过有损介质会发生衰减,且电导率越大,衰减越严重<sup>[19]</sup>。此外,电导率随频率升高而增大<sup>[16]</sup>。为避免无线激发器功能失效,须在其允许工作频带范围内尽量降低其工作频点。根据无线数据传输速率和国内无线电频带划分规定,设计的载波工作频点考虑在200 MHz~1 GHz范围内选取<sup>[11-12,16]</sup>。其中,315 MHz为常用公共频段,其频率比433 MHz更低,能够最大程度减小钻井液在高频下对激发器造成的衰减效应,所以考虑选择315 MHz作为工作频率。

315 MHz对应真空中1/4波长为238 mm,若按传统思路设计天线,则尺寸过大,无法应用到井下微球测量仪中。另一方面,电磁波穿过介质材料时,实际波长 $\lambda$ 与介电常数 $\epsilon_r$ 的平方根成反比:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_0$  为自由空间波长。将天线的激发场景由真空变为钻井液后, 由于钻井液的介电常数远高于真空, 其实际谐振点对应波长会大幅降低, 因此可以利用这一条件缩小天线尺寸。

本文借鉴 PIFA 天线的基础结构, 提出了辐射贴片弯折与地平面开槽的方法对 PIFA 天线进行改进, 使得一部分贴片的电流路径沿着弯折和开槽区域发生弯曲, 电流路径的有效长度变长, 从而使谐振频率降低<sup>[20]</sup>、天线尺寸缩小, 以便能够安装在微球测量仪表面。

## 2 微型 PIFA 共形天线设计

### 2.1 辐射贴片弯折与地平面开槽设计

为了验证上述辐射贴片弯折和地平面开槽的思路, 本文首先采用有限元分析方法(finite element method, FEM), 分析了天线在频率为 300 MHz 并浸泡在相对介电常数  $\epsilon_r=81$ 、电导率  $\sigma=1.258 \text{ S/m}$  的钻井液中, 其表面电流的分布情况如图 2 所示。由图 2 可知, 位于中心区域的电流倾向于从馈电点直接流向短路点, 但通过加载弯折型开槽结构, 迫使电流方向发生 90°弯曲, 使电流路径由直线型变为蛇型, 电流路径的有效长度和天线的特征波长变长, 进而在天线尺寸不变的情况下降低了谐振点频率。

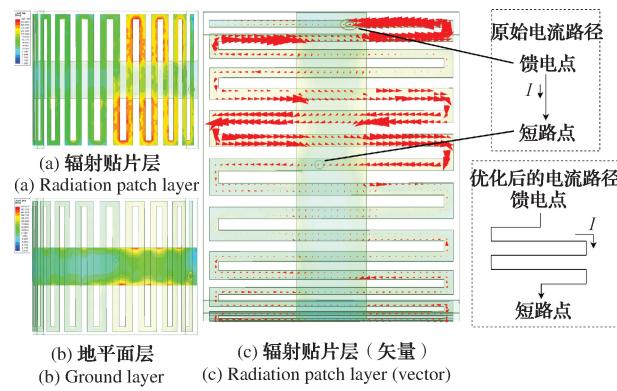


图 2 表面电流分布(顶部视图)

Fig. 2 Surface current distribution (top view)

进一步通过扫频的方式对仅加载辐射贴片弯折、仅加载地平面开槽和未加载任何结构的天线进行仿真, 结果如图 3 所示。仅加载辐射贴片弯折时, 谐振点频率为 450 MHz; 仅加载地平面开槽和未加载任何结构时, 扫频区间内无谐振点; 同时加载辐射贴片弯折和地平面开槽时, 谐振点频率为 310 MHz, 相比仅加载辐射贴片弯折降低了 31%, 与目标工作频率较为接近, 并且反射系数接近  $-45 \text{ dB}$ , 说明地平面开槽能够有效改善天线的阻抗匹配特性。

上述研究表明, 在 PIFA 天线中同时引入辐射贴片弯折与地平面开槽的方法, 能够在不改变天线尺寸的前提下, 有效降低谐振点频率, 说明设计思路合理。

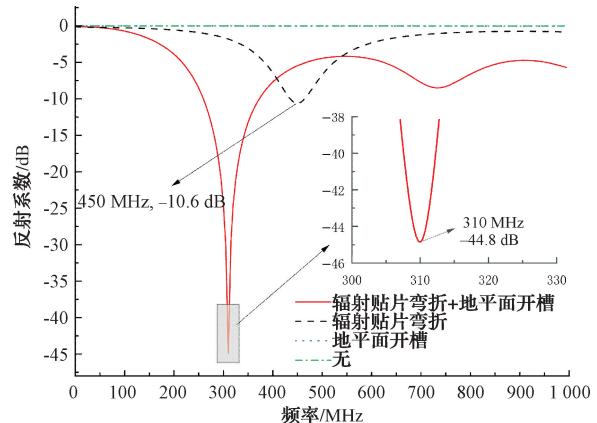


图 3 反射系数 vs. 加载的结构  
Fig. 3 Reflection coefficient vs. loaded structure

### 2.2 微型 PIFA 共形天线结构设计

井下上返式微球测量仪外形为  $\Phi 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的空心圆柱体, 微球外壳由特种工程塑料制成, 与外部环境连通, 内部装有电子元件, 天线弯曲一定角度后粘贴在外壳表面, 如图 4(a)所示。

为了与微球测量仪的外形结构相匹配, 天线基板考虑使用柔性聚酰亚胺(Polyimide, PI)薄膜, PI 薄膜能够承受井下高温环境, 并且可通过常规柔性印刷电路工艺(flexible printed circuit, FPC)制造。铜箔通过光刻的方式印刷在基板两侧, 双面无阻焊层, 短路点与馈电点使用过孔近似实现。顶层由弯折状的辐射贴片构成, 底层为开有两个对称槽的金属地, 馈电点位于底层, 由过孔馈电到顶层, 如图 4(b)所示。

### 2.3 天线参数计算

由天线设计思路可知, 该天线需要确定如下参数:  $L_{\text{sub}}$  和  $W_{\text{sub}}$  分别为基板的长度和宽度,  $L_{\text{top}}$  和  $W_{\text{top}}$  分别为辐射贴片的长度和宽度,  $L_{\text{btm}}$  和  $W_{\text{btm}}$  分别为金属地的长度和宽度,  $w$  和  $b$  分别为弯折线 X 轴宽度和 Y 轴宽度,  $g$  为弯折线间距,  $(X_f, Y_f)$  为馈电点坐标,  $(X_s, Y_s)$  为短路点坐标。

考虑到微球有效高度为 8.4 mm, 故基板宽度  $W_{\text{sub}}$  最大值为 8.4 mm。为粘胶剂预留 0.5 mm 间隙后, 基板长度  $L_{\text{sub}}$  最大值为 34.6 mm。设计要求天线只能占用微球侧边一半区域, 所以共形角度取 175°, 此时  $L_{\text{sub}}$  为 17 mm。根据 PIFA 谐振频率经验公式:

$$L_{\text{sub}} + W_{\text{sub}} - W = \frac{\lambda}{4} \quad (2)$$

假设短路点宽度  $W=1 \text{ mm}$ , 当  $W_{\text{sub}}$  取最大值 8.4 mm 时, 可保证天线谐振点频率取到最小值。设计要求天线在钻井液( $\epsilon_r=81$ )中谐振频率接近 315 MHz, 利用 Chattha 等<sup>[14]</sup>提出的 PIFA 谐振频率经验方程并结合式(1)得到, 辐射贴片宽度  $W_{\text{top}}=8 \text{ mm}$ , 辐射贴片长度  $L_{\text{top}}=16 \text{ mm}$ , 金属地长度  $L_{\text{btm}}=17 \text{ mm}$ 。为便于安装同轴电缆, 馈电点设计

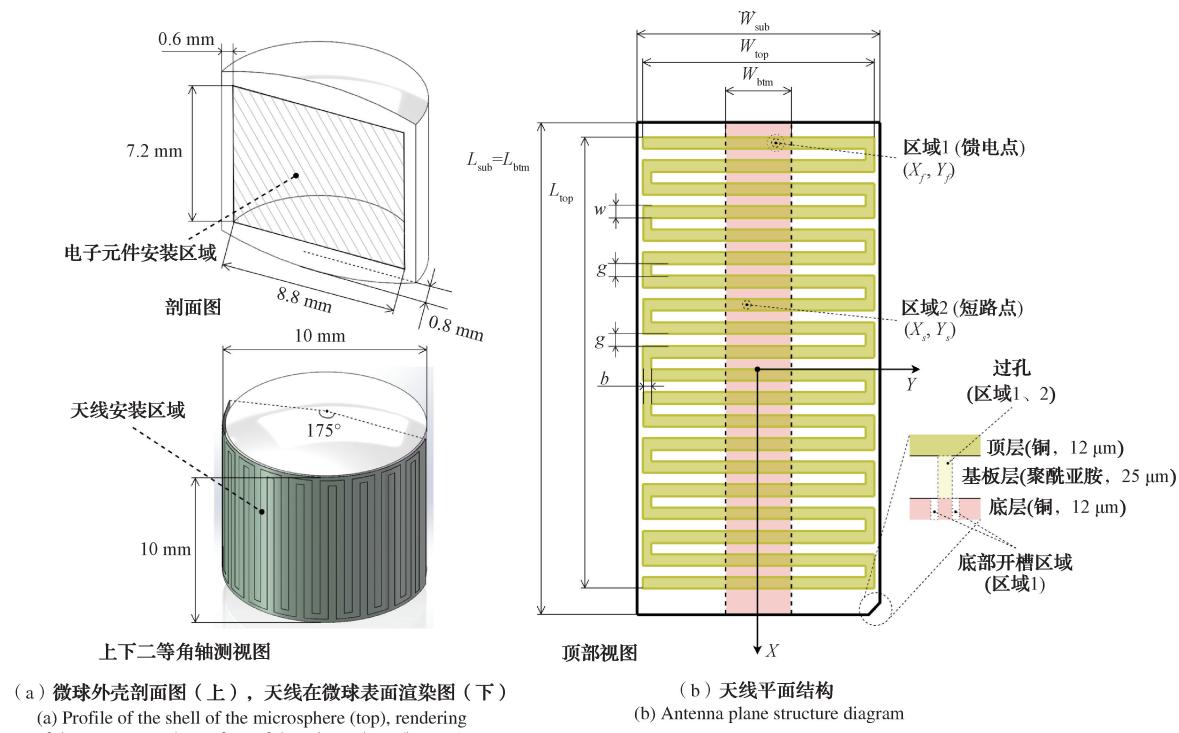


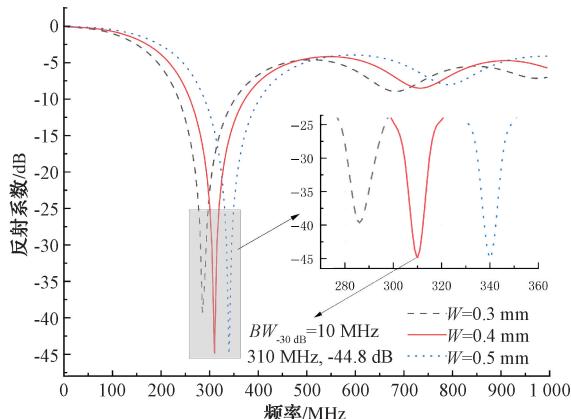
图 4 微球和天线结构

Fig. 4 Microspheres and antenna structures

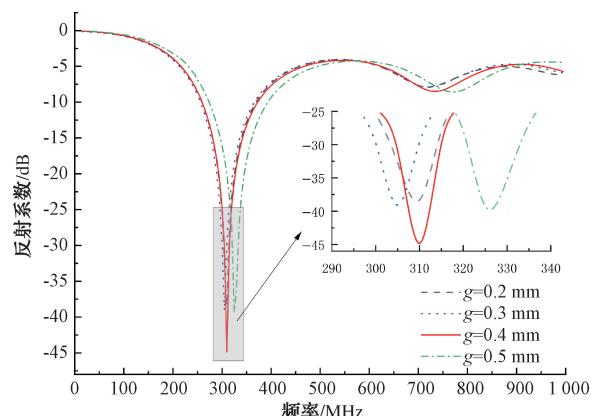
在天线边缘,坐标 $(X_f, Y_f)$ 为 $(-7.8 \text{ mm}, 0.6 \text{ mm})$ 。

利用长度为  $W_{\text{top}} - b$ 、宽度为  $g$  的长方形,按照间距  $w + g$ ,对顶层辐射贴片进行周期性开槽,相邻开槽区域之间  $Y$  轴偏移长度为  $b$ ,开槽数量为 19,最终形成蛇形弯折状结构。利用 2 个长度为  $L_{\text{btm}}$ 、宽度为  $(W_{\text{sub}} - W_{\text{btm}})/2$  的长方形,在金属地两侧对称开槽。开槽后的金属地长度为  $L_{\text{btm}}$ 、宽度为  $W_{\text{btm}}$ 。

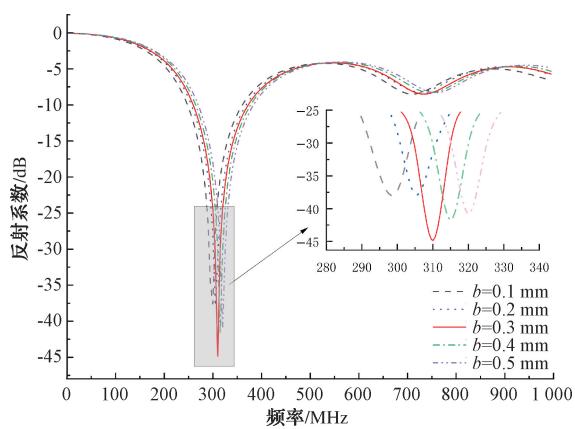
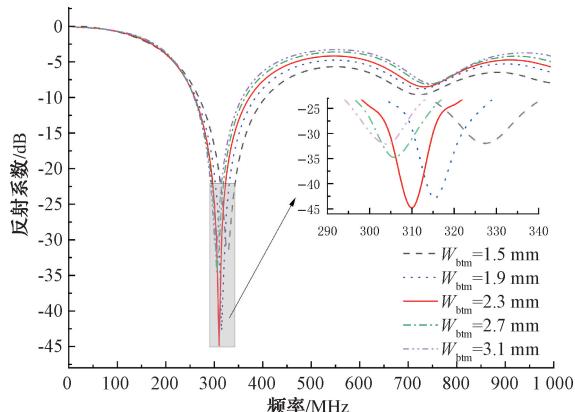
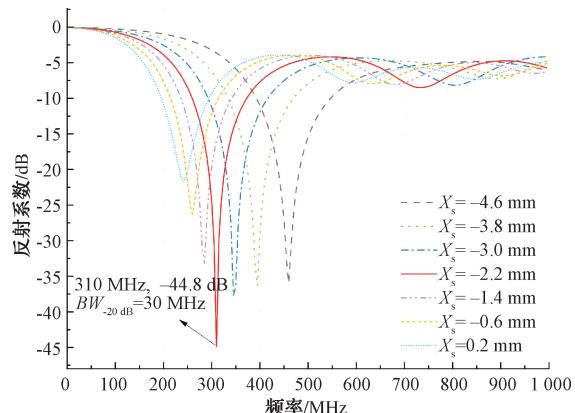
通过有限元分析方法对天线及外部材料进行建模后,对弯折和开槽相关参数( $w, g, b, W_{\text{btm}}$ )进行扫参分析,结果如图 5~8 所示。由仿真结果可知,当弯折线

图 5 反射系数 vs. 参数  $w$ Fig. 5 Reflection coefficient vs. parameter  $w$ 

$X$  轴宽度  $w = 0.4 \text{ mm}$ ,弯折线间距  $g = 0.4 \text{ mm}$ ,弯折线  $Y$  轴宽度  $b = 0.3 \text{ mm}$ ,金属地宽度  $W_{\text{btm}} = 2.3 \text{ mm}$  时,天线谐振点频率最接近 315 MHz 且具有最小的回波损耗。

图 6 反射系数 vs. 参数  $g$ Fig. 6 Reflection coefficient vs. parameter  $g$ 

同理,对余下的短路探针参数 $(X_s, Y_s)$ 进行扫参分析,结果如图 9、10 所示。其中,天线谐振点频率对短路探针  $X$  轴坐标  $X_s$  敏感,对短路探针  $Y$  轴坐标  $Y_s$  不敏感。通过高斯-牛顿算法对短路探针参数 $(X_s, Y_s)$ 进行优化

图 7 反射系数 vs. 参数  $b$ Fig. 7 Reflection coefficient vs. parameter  $b$ 图 8 反射系数 vs. 参数  $W_{bt}$ Fig. 8 Reflection coefficient vs. parameter  $W_{bt}$ 图 9 反射系数 vs. 参数  $X_s$ Fig. 9 Reflection coefficient vs. parameter  $X_s$ 

后,  $X_s = -2.2 \text{ mm}$ ,  $Y_s = -0.4 \text{ mm}$ 。天线最终结构参数如表 1 所示。

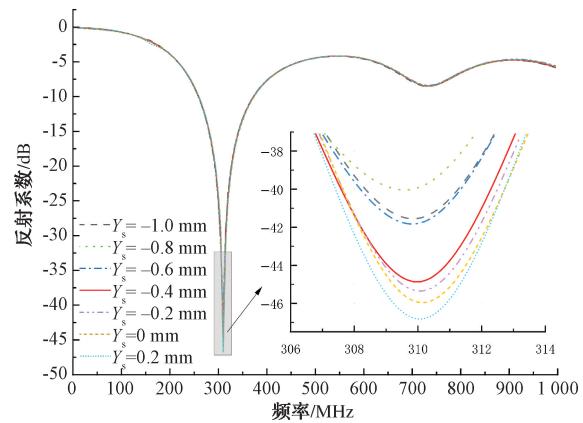
图 10 反射系数 vs. 参数  $Y_s$ Fig. 10 Reflection coefficient vs. parameter  $Y_s$ 

表 1 天线结构参数

Table 1 Antenna structure parameter

参数	取值/mm	参数	取值/mm
$W_{sub}$	8.4	$b$	0.3
$L_{sub}$	17	$W_{btm}$	2.3
$W_{top}$	8	$L_{btm}$	17
$L_{top}$	16	$(X_s, Y_s)$	$(-2.2, -0.4)$
$w$	0.4	$(X_f, Y_f)$	$(-7.8, 0.6)$
$g$	0.4		

### 3 天线性能影响因素研究

#### 3.1 钻井液电化学参数对天线的影响

由于现场采用的钻井液配方繁杂,部分溶解物可能造成钻井液电导率大幅上升。为对天线在高电导率钻井液中的性能进行量化评价,本文将针对两种钻井液开展研究。钻井液 1 为天线实际工作环境中所填充的钻井液,钻井液 2 为高电导率钻井液,配方和电化学参数如表 2 所示。其中,相对介电常数  $\epsilon_r$  是通过 Liu 等<sup>[21]</sup>所提出的 C 波段 SIW 谐振器测量液体介电常数方法,并结合高频电磁仿真软件仿真结果拟合得到;电导率  $\sigma$  是通过液体电导率测试仪 (LC-EC-2B) 测试得到。

表 2 25 ℃ 钻井液配方及电化学参数

Table 2 Formulation and electrochemical parameters of drilling fluid at 25 ℃

	钻井液 1	钻井液 2
水/mL	100	100
膨润土/g	5	5
烧碱/g	0.1	0.15
CMC/g	0.3	0.3
纯碱/g	0.1	0.3
$\epsilon_r$	81	96
$\sigma/(S \cdot m^{-1})$	1.258	3.080

仿真实验天线使用表 1 的参数,并处于 175°弯曲状态。为模拟井筒内部的钻井液,将仿真模型中钻井液形状设置为高度和直径均为 180 mm 的圆柱体,天线放置于中心,以模拟天线完全浸泡在钻井液中,如图 11 所示。钻井液的相对介电常数和电导率分别设置为前文提到的钻井液电化学参数的组合,即  $\epsilon_r$  为 81、96 与  $\sigma$  为 1.258、3.080 S/m 的 4 种组合,并运行仿真。

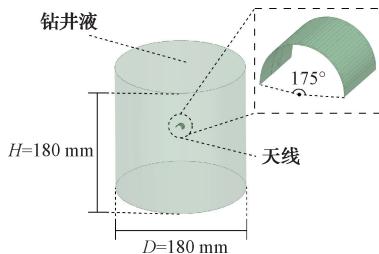


图 11 仿真场景

Fig. 11 Simulation scenario

不同钻井液电化学参数组合中,反射系数随频率变化规律如图 12 所示。当  $\epsilon_r$  由 81 升高到 96 时,天线谐振点频率降低 10 MHz,此时天线谐振点发生红移,与理论相符;当  $\sigma$  由 1.258 S/m 升高到 3.080 S/m 时,谐振点处反射系数升高 27~32 dB,说明天线在高电导率钻井液中损耗较为严重,表明文献[19]的结论对钻井液同样适用。

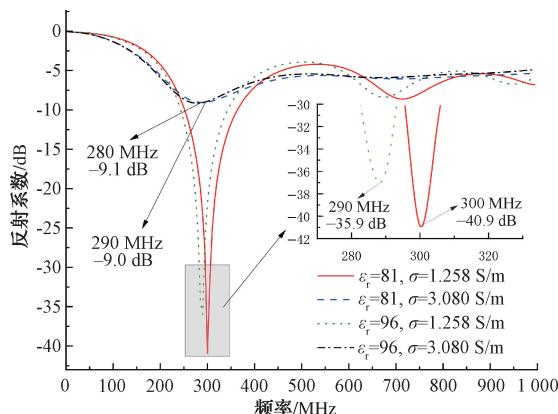
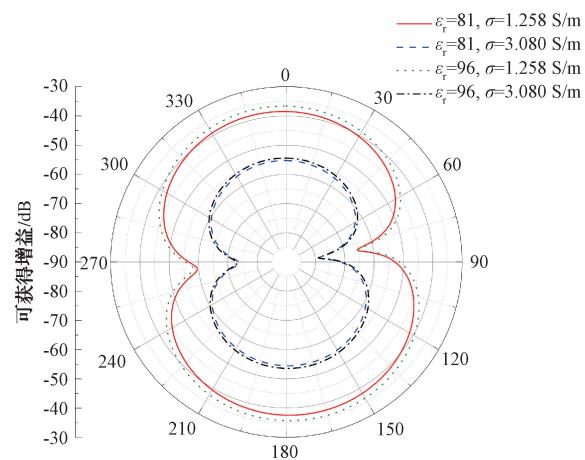
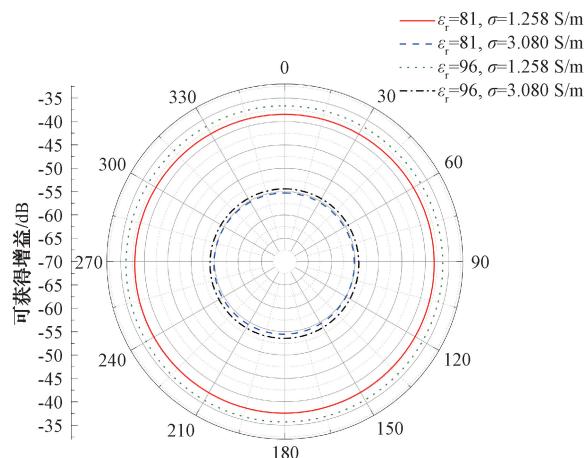


图 12 反射系数 vs. 钻井液电化学参数

Fig. 12 Reflection coefficient vs. electrochemical parameters of drilling fluid

不同钻井液电化学参数组合中,增益方向图如图 13、14 所示,方向图的 3D 图案大致为“苹果”形状。方向图中  $\varphi=0^\circ$  存在两个不灵敏区,  $\varphi=90^\circ$  为圆形,表明天线具有较为理想的全向辐射特性。当  $\epsilon_r$  由 81 升高到 96 时,方向图的幅值变化小于 1 dB,表明天线方向性受钻井液相对介电常数变化不敏感;当  $\sigma$  由 1.258 S/m 升高到 3.080 S/m 时,天线增益下降约 18.6 dB,天线此时最大增益小于  $-50$  dB,说明天线在高电导率钻井液中性能急剧恶化,进一步论证了文献[19]的结论。

图 13 方向图( $\varphi=0^\circ$ )vs. 钻井液电化学参数Fig. 13 Directional diagram ( $\varphi=0^\circ$ ) vs. electrochemical parameters of drilling fluid图 14 方向图( $\varphi=90^\circ$ )vs. 钻井液电化学参数Fig. 14 Directional diagram ( $\varphi=90^\circ$ ) vs. electrochemical parameters of drilling fluid

### 3.2 基板材料对天线的影响

为了研究聚酰亚胺与其他主流基板材料对天线性能的影响,并进一步验证聚酰亚胺作为基板材料的可行性。通过有限元方法对基板材料进行仿真分析,仿真场景同 3.1 节,钻井液相对介电常数和电导率设置为 81 和 1.258 S/m,基板材料分别设置为聚酰亚胺和 Preperm 255<sup>[11]</sup>、Ultralam 3850HT<sup>[13]</sup> 和 Rogers 5880<sup>[16]</sup>,厚度均为 25  $\mu\text{m}$ ,并运行仿真。上述基板材料的相关参数如表 3 所示。

不同基板材料的组合中,反射系数随频率的变化规律如图 15 所示。当基板材料发生变化时,谐振点频率发生小幅变化(最大 35 MHz)、谐振点幅值变化相对较大(最大 15.7 dB)。其中,Ultralam 3850HT 拥有最接近设计频率的谐振点和最低的回波损耗,其次为聚酰亚胺。Rogers 5880 和 Preperm 255 的回波损耗比前述两种材料高 12 dB,其性能表现并不理想。方向图如图 16、17 所示,当

表3 各基板材料的相关参数  
Table 3 Related parameters of each substrate material

	聚酰亚胺	Preperm 255	Ultralam 3850HT	Rogers 5880
$\epsilon_r$	3.5	2.55	3.14	2.2
$\tan\delta$	0.008	0.0005	0.002	0.0009
$\epsilon_r$ 热稳定系数( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	—	—	+24	-125
最小厚度/ $\mu\text{m}$	25	100	25	127
参考价格 <sup>*</sup> (人民币/元)	33	—	>200	>132

注: \* 尺寸为  $10 \times 10 \text{ mm} \times$  最小厚度, 双层板, 最小铜厚, 1 片(小批量试制); — 表示未能查询到有效数据

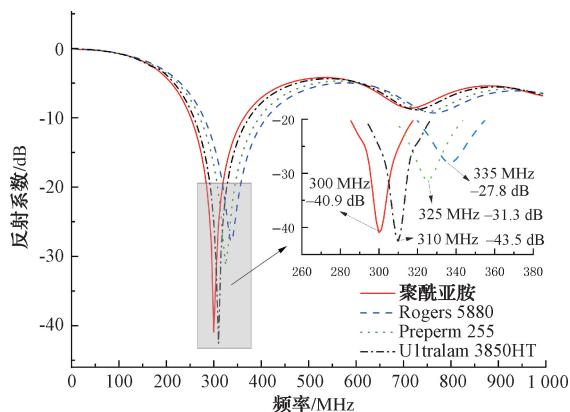


图15 反射系数 vs. 基板材料  
Fig. 15 Reflection coefficient vs. substrate material

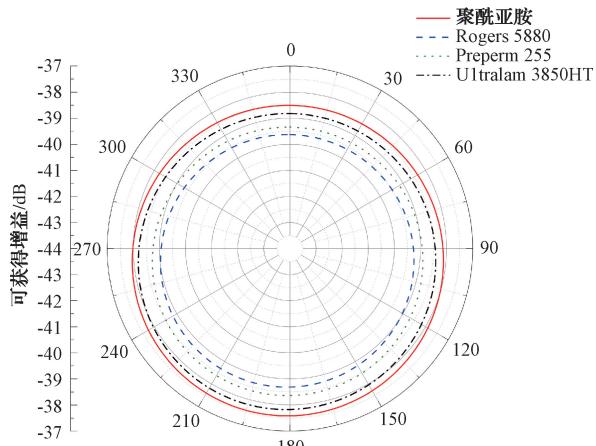


图17 方向图( $\varphi=90^{\circ}$ ) vs. 基板材料  
Fig. 17 Orientation diagram ( $\varphi=90^{\circ}$ ) vs. substrate material

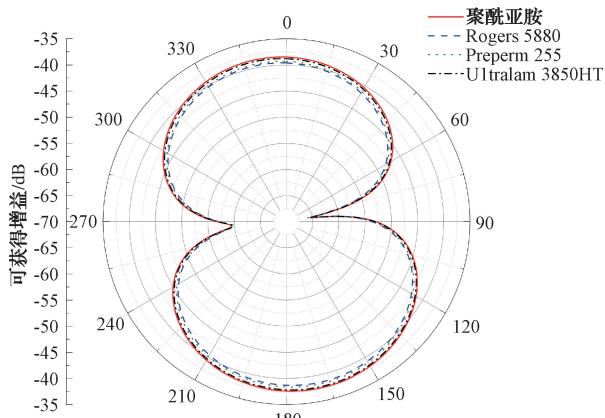


图16 方向图( $\varphi=0^{\circ}$ ) vs. 基板材料  
Fig. 16 Orientation diagram ( $\varphi=0^{\circ}$ ) vs. substrate material

基板材料发生变化时, 方向图变化较小(最大为 1 dB), 表明天线的增益和方向特性受基板材料影响较小。

从仿真结果可以观察到, 聚酰亚胺在目标频率范围内具有和 Ultralam 3850HT 接近的阻抗匹配特性。考虑到 Ultralam 3850HT 是一种针对柔性场景设计的低损耗高频板材, 制造成本高。相比之下, 聚酰亚胺虽然性能略逊于 Ultralam 3850HT, 但其性能已能够满足现场应用的需

要。考虑到, 单井次的微球测量仪投放量高达上千颗, 聚酰亚胺的成本仅有 Ultralam 3850HT 的  $1/6$ 。综合考虑现场需求、性能、成本和推广等因素, 聚酰亚胺板材更符合本文的应用场景。

## 4 天线制作及实际性能测试

### 4.1 天线制作与性能测试方法

根据设计方案, 最终天线成品由柔性印刷电路工艺制作, 基板材料为聚酰亚胺薄膜( $\epsilon_r=3.5$ , 厚度  $25 \mu\text{m}$ ), 顶层和底层图案由铜箔经光刻制成(厚度  $12 \mu\text{m}$ ), 馈电点和短路点使用过孔(外径  $0.35 \text{ mm}$ , 内径  $0.15 \text{ mm}$ )实现, 顶层和底层无阻焊层覆盖, 天线实物如图 18(a)所示。同轴电缆选用 RF113 线材(外径  $1.2 \text{ mm}$ , 内径  $0.5 \text{ mm}$ , 长度  $10 \text{ cm}$ , 阻抗  $50 \Omega$ ), 一端通过焊接的方式与天线连接, 另一端为 SMA 连接器, 如图 18(b)所示。天线弯曲  $175^{\circ}$  后通过胶带固定在微球测量仪表面, 如图 18(c)所示。

天线随后连接到如图 18(d)所示的矢量网络分析仪(Lite VNA), 并被分别放置到装有钻井液 1 和钻井液 2 的空心圆柱体的中央区域, 处于完全浸没状态, 如图 19 所示。测试用到的钻井液的电化学参数已在表 2 中给出, 测试过程中钻井液温度为  $25^{\circ}\text{C}$ 。测试容器为直径  $55 \text{ mm}$ 、

高度 65 mm 的空心圆柱体结构, 材质为 PET 塑料, 与现场地面管汇数据读取器内部尺寸基本一致, 能够模拟微球测量仪返出后在地面管汇内进行短距离数据交互的场景。

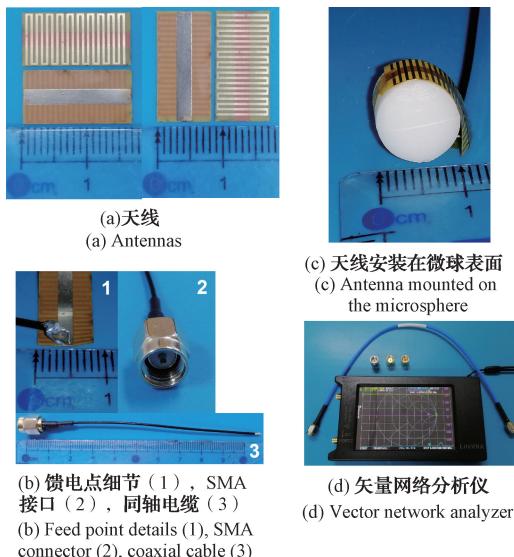


图 18 天线及测试仪器

Fig. 18 Antennas and test instruments

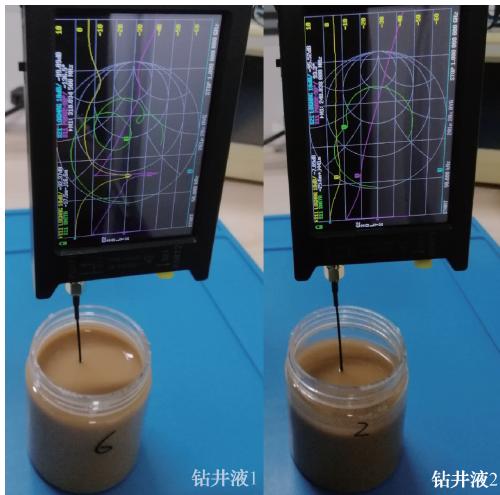


图 19 测试场景

Fig. 19 Test scenario

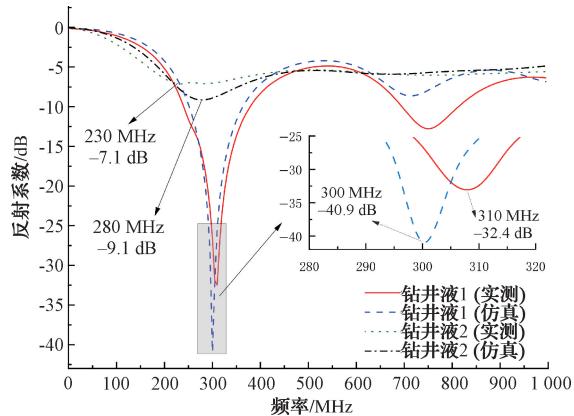


图 20 反射系数 vs. 钻井液

Fig. 20 Reflection coefficient vs. drilling fluid

#### 4.2 不同钻井液中测试结果分析

天线在不同钻井液中测得的反射系数随频率变化曲线如图 20 所示。天线在钻井液 1 中谐振点频率为 310 MHz, 对应幅值为 -32.4 dB; 天线在钻井液 2 中谐振点频率为 230 MHz, 对应幅值为 -7.1 dB。测试结果表明, 天线受钻井液相对介电常数影响较小, 受钻井液电导率影响较大, 表现为天线在钻井液 2 中谐振点频率相比钻井液 1 降低了 25%, 而回波损耗上升了 78%, 该结论与仿真结果一致。此外, 测得的谐振点频率与仿真基本一致, 但谐振点处幅值与仿真相差较大, 这是因为仿真过程中未考虑钻井液的介电损耗(即  $\tan\delta=0$ ), 而测试所用的钻井液具有较高的介电损耗, 导致部分电磁波能量耗散在钻井液中, 进而表现为回波损耗整体升高。

类似天线的性能参数如表 4 所示, 可知, 本文所提出的天线平面尺寸较文献[16]缩小了 68%、谐振点频率较文献[16]降低了 28%、谐振点处回波损耗较文献[11]降低了 14%、工作环境相对介电常数较文献[11, 13, 16]平均提高了 20%。上述结果表明, 本文所提出的辐射贴片弯折与地平面开槽方法, 能够在满足天线性能的前提下, 有效地在缩小天线尺寸的同时, 降低谐振点频率和回波损耗。

相比文献[11, 13, 16]提出的天线, 本文所提出的天线尺寸更小、谐振点频率更低、回波损耗更低, 同时能够工作

表 4 本文所提出天线与类似天线的对比

Table 4 The comparison between the proposed antenna and similar antennas

	本文	文献[11]	文献[13]	文献[16]
谐振点频率/MHz	310	433	915	433
谐振点回波损耗/dB	-32	-28	-23	-19
平面尺寸/mm	17×8.4×0.049	31.4×30.7×0.1	53.5×10×0.2	30×15×0.254
共形方式	175°弯曲	360°弯曲	360°弯曲	360°弯曲
工作环境相对介电常数	81	56.9~67.2	55~65	56.9~67.2
工作环境电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	1.258	0.8~1.92	0.948~2.17	0.805~1.92
基板材料	聚酰亚胺	Preperm 255	Ultralam 3850 HT	Rogers 5880

在相对介电常数更高的钻井液环境，并且能够通过常规FPC工艺制造，在对尺寸和成本敏感的钻井液环境全向近距离无线通信领域具有一定的应用价值。

## 5 结 论

本文提出了一种用于钻井液环境无线传输的微型PIFA共形天线，基板材料为聚酰亚胺薄膜。天线结构简单，尺寸较传统PIFA天线更小，能够保证微球测量仪外形尺寸控制在10 mm以内。此外，在天线尺寸仅为17 mm×8.4 mm×0.049 mm的条件下，通过辐射贴片弯折与地平面开槽的方法，将天线的谐振点频率控制在了310 MHz，该频点的-20 dB带宽为35 MHz、-10 dB带宽为135 MHz。天线在不同相对介电常数和电导率的钻井液中，均具有较为理想的全向辐射特性。相比其他天线，本文所提出的天线在尺寸、谐振点频率和回波损耗等性能指标上均具有一定的先进性，能够用于微球测量仪在钻井液环境中的无线通信，使原有微球测量仪的数据传输方式由有线通信变为了无线通信，降低了井下测量短节的设计难度，提升了数据传输的时效性，推动了上返式微球测量仪随钻测量系统进入实际应用的新阶段，在井下近距离无线通信领域具有很大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] 吴东华. 随钻测量随钻测井技术现状及研究[J]. 化工管理, 2023, 30(4): 79-82,88.  
WU D H. Status quo and research on measurement while drilling and logging technology[J]. Chemical Management, 2023, 30(4): 79-82,88.
- [2] CARCIONE J M, POLETTI F. Electric drill-string telemetry[J]. Journal of Computational Physics, 2003, 186(2): 596-609.
- [3] 付信信. 石油水平井钻井EM-MWD信号传输特性分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.  
FU X X. Analysis of EM-MWD signal transmission characteristics in oil horizontal well drilling [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [4] 陈静, 刘勇. EM-MWD系统无线传输技术探讨[J]. 电子测量技术, 2009, 32(10): 4-7.  
CHEN J, LIU Y. Discussion on wireless transmission technology of EM-MWD system [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(10): 4-7.
- [5] 邵春, 付信信, 褚志伟, 等. 基于ANSYS的地层分层对EM-MWD信号传输的影响分析[J]. 钻采工艺, 2017, 40(4): 7-9,1.  
SHAO CH, FU X X, CHU ZH W, et al. Analysis of influence of formation stratification on EM-MWD signal transmission based on ANSYS[J]. Drilling & Production Technology, 2017, 40(4): 7-9,1.
- [6] 庞平, 李枝林, 夏文鹤. 泵送式井下测压微球的研制与试验[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 1-3,5.  
PANG P, LI ZH L, XIA W H. Development and test of pumped microspheres for downhole pressure measurement[J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 1-3,5.
- [7] 刘伟, 廖茂林, 李牧, 等. 基于MEMS微芯片的井下多物理场微型测量器[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(3): 87-95.  
LIU W, LIAO M L, LI M, et al. Downhole multi-physical field micrometer based on MEMS microchip[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(3): 87-95.
- [8] 天工. 2018年国际石油十大科技进展(六)——先进的井下测控微机电系统传感器技术快速发展[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 40.  
TIAN G. Top ten scientific and technological advances in international petroleum in 2018 (SIX)—rapid development of advanced microelectromechanical system sensor technology for downhole measurement and control[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 40.
- [9] 朱祖扬, 李光泉, 张卫, 等. 井筒微芯片示踪器研制[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 111-114.  
ZHU Z Y, LI G Q, ZHANG W, et al. Development of wellbore microchip tracer[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 111-114.
- [10] 朱祖扬, 张卫, 倪卫宁, 等. 基于MSP430的微芯片示踪器电路系统[J]. 仪表技术与传感器, 2013, 43(6): 40-42,48.  
ZHU Z Y, ZHANG W, NI W N, et al. Microchip tracer circuit system based on MSP430 [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, 43(6): 40-42,48.
- [11] MIAH M S, KHAN A N, ICHELN C, et al. Antenna system design for improved wireless capsule endoscope links at 433 MHz[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67 ( 4 ): 2687-2699.
- [12] YOUSAF M, MABROUK I B, FAISAL F, et al. Compacted conformal implantable antenna with multitasking capabilities for ingestible capsule endoscope[J]. IEEE Access, 2020, 8(1): 157617-157627.
- [13] DAS R, YOO H. A wideband circularly polarized conformal endoscopic antenna system for high-speed data transfer[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(6): 2816-2826.

- [14] CHATTHA H T, HUANG Y, ZHU X, et al. An empirical equation for predicting the resonant frequency of planar inverted-F antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8(1): 856-860.
- [15] LEE D, PARK P, KIM J, et al. Aperture-coupled UHF RFID reader antenna for a handheld application[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50(5): 1261-1263.
- [16] OSMAN S A, EL-GENDY M S, ELHENNAWY H M, et al. Reconfigurable flexible inverted-F antenna for wireless capsule endoscopy[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2022, 155(154377): 1-13.
- [17] 陈蓬旭. 宽带双极化微带贴片天线的研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2022.
- CHEN P X. Research on wideband dual-polarized microstrip patch antenna [D]. Beijing: Electronic Science Research Institute of China Electronics Science and Technology Corporation, 2022.
- [18] 刘路路, 丁宇星. 一种小型化超宽带单极子缝隙天线的设计[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(5): 142-143,152.
- LIU L L, DING Y X. Design of a miniaturized ultra-wideband monopole slot antenna [J]. Industrial
- Control Computers, 2024, 37(5): 142-143,152.
- [19] JAAFAR A N, AFAR H J, YAMADA Y, et al. Performance analysis of buffer material's electrical conductivity for the underwater antennas[C]. 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2023, 1(1): 1-2.
- [20] 黄梦雅, 丁召, 胡明哲. UWB天线的宽带化技术及其发展[J]. 电讯技术, 2014, 54(2): 236-244.
- HUANG M Y, DING ZH, HU M ZH. Wideband technology of UWB antenna and its development[J]. Telecommunication Technology, 2014, 54 (2 ): 236-244.
- [21] LIU C J, TONG F. An SIW resonator sensor for liquid permittivity measurements at C band[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(11): 751-753.

## 作者简介

夏文鹤(通信作者),博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为油气田自动化和井下通信技术等。

E-mail:swpuxwh@swpu.edu.cn

邓力浩川,硕士研究生,主要研究方向为井下微型通信设备。

E-mail:1054604661@qq.com