

引用格式: 曾庆刚, 高嵩, 李松, 等. 低频混合折叠偶极子无人机载探地雷达天线 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(6): 906-915.

ZENG Q G, GAO S, LI S, et al. A low-frequency hybrid folded dipole UAV-mounted GPR antenna[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(6): 906-915.

## 低频混合折叠偶极子无人机载探地雷达天线



曾庆刚<sup>1</sup>, 高嵩<sup>1,2\*</sup>, 李松<sup>1</sup>, 辛翔<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学机电工程学院, 成都 610059; 2. 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

**摘要:** 设计一种由线形折叠偶极子和蝶形偶极子串联组成的混合折叠偶极子贴片天线, 通过对天线尾部分布电流较小的线形辐射导体进行折叠以及对天线进行介质加载, 使天线低频端的增益在物理长度大幅减小后仍然能接近标准半波天线的增益; 同时在 Wu-King 加载理论的基础上提出一种“宽带加载, 局部优化”的高效电阻加载实现方法。设计完成的天线尺寸为 1 800 mm×200 mm×1 mm, 最低工作频率为 20 MHz。天线仿真和测试结果表明该天线具有接近标准半波天线的低频增益, 且不存在明显的振铃效应。

**关键词:** 新型探地雷达天线; 天线小型化技术; 低频超宽带天线; 高效电阻加载; 介质加载

中图分类号: TN822+.8

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2025036

## A low-frequency hybrid folded dipole UAV-mounted GPR antenna

ZENG Qinggang<sup>1</sup>, GAO Song<sup>1,2\*</sup>, LI Song<sup>1</sup>, and XIN Xiang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. The Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology, Ministry of Education, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** A hybrid folded dipole patch antenna (HFDPA) composed of linear folded dipole and bow-tie dipole is proposed. By bending the tail linear radiation conductor with relatively small distributed current at the antenna and loading the dielectric onto the antenna, the gain at the low-frequency end of this antenna can still approach the gain of a standard half-wave antenna even after the physical length is significantly reduced. Meanwhile an efficient resistive loading implement method of “broadband loading, local optimization (BLLO)” is proposed based on the classical Wu-King loading theory. The size of the finished antenna is 1800 mm × 200 mm × 1 mm and the minimum operating frequency is 20 MHz. The antenna simulation and test results prove that the antenna has a low-frequency gain close to the standard half-wave antenna, and there is no obvious ringing effect.

**Key words:** new type of GPR antenna; technology of antenna miniaturization; low-frequency UWB antenna; efficient resistive loading; dielectric loading

低频探地雷达 (< 200 MHz) 主要用于探测地下深部结构或特定大型目标, 如地下洞穴、掩体、河流和矿山等<sup>[1]</sup>。基于无人机的机载探地雷达可以实现更加高效的探测, 但是其工作机制从传统的地面耦合方式转换成空气耦合方式, 造成电磁损耗变大, 使探测深度大大降低。根据电磁场理论<sup>[2]</sup>, 电磁波在介质中的传播损耗与工作频率成正比, 因此, 为了获得足够的穿透深度, 更低频率 (低至 20 MHz) 的空气耦合天线的研制变得尤为重要。

天线是探地雷达的关键部件之一。天线的性能对探地雷达的辐射功率和接收灵敏度都有着极大的

影响, 可以认为天线性能在很大程度上决定了探地雷达的探测深度。一般来说, 适用于探地雷达的天线可以分为几种类型, 如单极子天线<sup>[3-7]</sup>、偶极子天线<sup>[8-10]</sup>、喇叭天线<sup>[11-13]</sup>、渐变槽线天线<sup>[14-17]</sup>等。蝶形 (Bow-tie) 偶极子天线是探地雷达系统中最常用的天线之一, 因为它具有很好的对称辐射特性、宽带属性、线性相位特性、相对较高的增益和良好的耦合等优点<sup>[18-20]</sup>。但是当工作频率下降到 20 MHz 时, 标准半波蝶形天线的长度将达到 7.5 m, 这在实际的无人机载探地雷达应用中是不可接受的。

现有偶极子天线研究工作大都聚焦于改变天线

收稿日期: 2025-02-20

基金项目: 四川省科技计划项目 (2023YFG0327); 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003202)

作者简介: 曾庆刚, 主要从事无线通信和移动通信方面的研究。

\*通信作者 E-mail: gs@cdu.edu.cn

辐射导体形状<sup>[20-21]</sup>、增加反射背腔<sup>[22-26]</sup>以及通过阻性加载拓展天线阻抗带宽<sup>[19]</sup>等内容,而聚焦偶极子天线结构小型化技术研究的文献较少。

文献[1]提出了一种线形螺旋偶极子天线,将总长度为2 960 mm的线形辐射导体卷曲在750 mm×315 mm的平面空间分布,并根据Wu-King加载公式在偶极子的每条臂上加载了65个电阻,加载后实测的天线最低谐振频率在310 MHz附近,并且由于过度加载降低了天线辐射效率,不得不并联一个蝶形偶极子天线来提高天线辐射效率。从最低谐振频率的测试结果看,这种小型化的方式对降低天线工作频率并无益处。

文献[27]提出了一种蝶形折叠(F-Bowtie)偶极子天线,将蝶形辐射导体折叠后分布于支撑材料的上下表面,从而减小天线长度。文献中只提及了设计思路,并未制作天线实物进行电性能指标测试,而且从结构上看,上下表面辐射导体中的低频电流方向相反,在一定程度上会降低天线低频端的增益。

文献[28]提出了一种铁氧体加载的低剖面接地蝶形环路天线,其最低工作频率为36.8 MHz,天线长度为最低工作频率波长 $\lambda_L$ 的12%,但是天线在30 MHz处的增益仅为-16.9 dBi。

文献[29]设计了一种基于高介电常数材料的小型化天线,天线长度仅为 $0.096\lambda_L$ ,但是天线在最低工作频率处的增益只有-13.9 dBi。文献[30]设计了一款最低工作频率为30 MHz的加载弯折贴片的立体折叠式小型化蝶形天线,天线长度为 $0.14\lambda_L$ ,但是天线在最低工作频率处的增益仅为-12.6 dBi。为了在减小天线物理长度的同时获得与标准半波蝶形天线接近的增益性能,本文从电磁场基本理论出发,通过分析线形偶极子天线上的电流分布,提出一种用线形折叠辐射导体替换蝶形天线末端分布电流较小的辐射导体的小型化方法,从而形成了一种由线形折叠偶极子和蝶形偶极子组成的新型小型化探地雷达天线——混合折叠偶极子贴片天线(hybrid folded dipole patch antenna, HFDPA)。为了在不增加天线物理长度的同时提高天线增益,采用高介电常数、低介质损耗的氧化铝陶瓷片对HFDPA天线进行了介质加载,通过增加辐射导体的等效电长度提高了天线增益。为了在减小天线振铃的同时实现高效电阻加载,根据Wu-King加载理论推导出Wu-King电阻加载应用公式,并在此基础上提出一种“宽带加载,局部优化(broadband loading local optimization, BLLO)”的高效电阻加载实现方法。

设计完成的HFDPA天线尺寸为1 800 mm×200 mm×1 mm,最低工作频率为20 MHz,天线长度是标准半波天线的24%( $0.12\lambda_L$ )。利用三维电磁场仿真软件HFSS对标准半波天线(S-Bowtie)、F-Bowtie天线、介质加载前的HFDPA天线(H-Bowtie)和介质加载后的HFDPA天线(DH-Bowtie)进行了增益性能的对比仿真,仿真结果证明DH-Bowtie天线具有与S-Bowtie天线接近的低频增益性能。

对应用BLLO高效电阻加载方法的HFDPA天线进行了振铃效应测试,测试结果证明BLLO方法具有较好地减小振铃效应的效果,从而为低频探地雷达空耦天线的小型化设计提供了一种新的思路和参考。

## 1 理论分析

### 1.1 天线折叠的理论依据

根据电磁场相关理论<sup>[2]</sup>,线形偶极子天线上的分布电流可以表示为:

$$I(z) = I \sin[k(l - |z|)] \quad |z| \leq l \quad (1)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$ 为相位常数; $l$ 为偶极子单臂长度; $z$ 为天线上任意一点的位置。

依据式(1),假设 $l=3.75$  m(20 MHz的 $\lambda/4$ ),分别计算线形偶极子天线单条臂上发射140、70、40、20 MHz信号时的归一化分布电流,结果如图1所示,图中纵轴表示归一化电流幅度,横轴表示天线上点的位置。由于线形偶极子天线可以被看作是开路双线传输线的展开形式,所以图1中的0 m处(电流幅度的第1个0点处)对应天线的开路端。

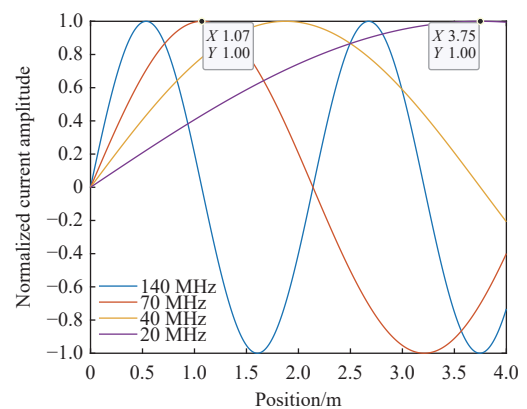


图1 线形偶极子天线单臂上的归一化电流分布

由图1可知,20 MHz信号的归一化电流幅度在3.75 m处达到最大值,而且在20~140 MHz频

带内上升最缓慢。针对图 1 所示的分布电流特点,按照图 2 所示的折叠方式对天线尾部(开路端)分布电流较小的辐射导体进行折叠,就能在减小天线长度的同时降低对天线低频端增益的影响。



图 2 线形偶极子天线折叠方式示意图

在图 2 所示的折叠方式中,虽然折叠部分纵向相邻导体的电流方向相反,会导致天线增益下降,而且天线等效电长度会小于折叠前的电长度,但是由于低频端在折叠部分的分布电流较小,增益下降的程度远小于高频端,由于折叠导体的总长度远大于折叠部分占用的天线长度,因而在一定程度上增加了折叠天线的等效电长度,从而降低了天线折叠对低频增益的影响。

综上所述,图 2 所示天线折叠方式是一种适用于低频超宽带天线的小型化方式。

## 1.2 介质加载的理论依据

根据电磁场相关理论<sup>[2]</sup>,介质中的波长与频率的对应关系为:

$$\lambda_D = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_D$  为介质中的波长;  $c$  为光速;  $f$  为频率;  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数。

由式(2)可知,相同频率的电磁波在介质中的波长小于自由空间中的波长,根据等效电长度的定义,也可以理解为相同长度的辐射导体在介质基板作用下的等效电长度大于自由空间中的电长度。

基于上述分析,如果在天线的辐射导体上覆盖一层高介电常数、低介质损耗的介质基板,将会在不增加天线物理长度的前提下,增加辐射导体的等效电长度,从而提高天线增益。

## 2 天线设计

### 2.1 天线结构设计

由于蝶形偶极子天线具有高增益的优点,为了在小型化的同时提高天线增益,将图 2 中右端未折叠辐射导体替换为蝶形辐射导体就得到 HFDPA 天线的结构。考虑到项目组采用的大疆 T60 型无人机在机臂展开、桨叶折叠时的长度和宽度分别为 2 035 mm 和 1 650 mm,以及保证雷达收发隔离度的收发天线间距需要大于 1 000 mm,为了避免增加无人机风阻引起飞行安全问题,将天线的总长度

和宽度设定为 1 800 mm×200 mm,为了加工方便,将 HFDPA 天线放置于厚度为 1 mm 的环氧玻纤(FR-4)介质基板上,设计完成的天线结构如图 3 所示,为了充分利用介质基板的空間,将线形折叠辐射导体放置于介质基板的上下表面,天线馈电点间距设置为 1 mm。

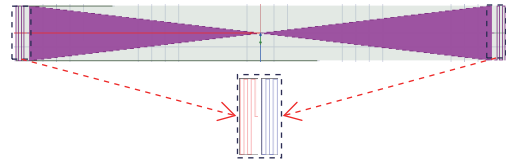


图 3 设计完成的天线结构

由天线总长度和馈电点间距得到单臂辐射导体的占用长度为 899.5 mm,将增益贡献最大的蝶形辐射导体的长度设置为 850 mm,而将线形折叠辐射导体的占用长度设置为 49.5 mm。

蝶形辐射导体是 1 个底边为 200 mm、高为 850 mm 的等腰三角形辐射导体。线形折叠辐射导体由放置于介质基板下表面的 5 段长度为 200 mm 的纵向辐射导体、4 段长度为 10 mm 的横向辐射导体(图 3 中的蓝色实线段)和放置于介质基板上表面的 4 段长度为 200 mm、1 段长度为 100.5 mm 的纵向辐射导体以及 4 段长度为 10 mm、1 段长度为 9.5 mm 的横向辐射导体(图 3 中的红色实线段)组成,线形折叠辐射导体的总长度为 1 990 mm,宽度为 1 mm。

为了证明 HFDPA 天线具有与标准半波天线接近的低频增益性能,利用 HFSS 分别建立了 7.5 m 长 S-Bowtie 天线、3.75 m 长 F-Bowtie 天线、1.8 m 长 H-Bowtie 天线和 1.8 m 长 DH-Bowtie 天线的仿真模型,4 种天线模型的宽度均为 200 mm,且辐射导体均放置于对应长度和宽度的 FR-4 介质基板(厚度均为 1 mm)上,介质加载采用的氧化铝陶瓷片(相对介电常数为 9.8,介质损耗角正切为 0)的尺寸为 1 800 mm×200 mm×1 mm,20 ~ 140 MHz 增益系数的对比仿真结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出:1) H-Bowtie 天线的低频端增益略优于 F-Bowtie 天线,说明图 2 所示折叠方式对低频端增益的影响小于文献[27]提出的折叠方式,与 1.1 节的分析一致;2) DH-Bowtie 天线在大部分频点的增益优于 H-Bowtie 天线,说明介质加载有效提升了天线增益,与 1.2 节的分析一致;3) DH-Bowtie 天线的增益平坦度优于 F-Bowtie 天线和 H-Bowtie 天线,20 MHz 增益系数

(1.5) 最接近 S-Bowtie 天线 (1.7)。综上分析, 说明介质加载后的 HFDPA 天线达到低频率、小尺寸和高增益的设计目标。

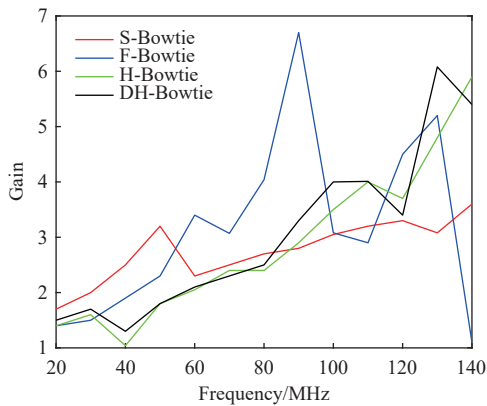


图 4 4 种天线增益系数的对比仿真结果

由于天线的辐射场是电路上众多分布电流元产生的叠加场<sup>[2]</sup>, 所以电流幅度和电流方向决定了叠加场的大小。由图 1 可知, 20 MHz 信号在 3.75 m 以内的分布电流单调递增, 所以图 4 中单臂长度为 3.75 m, 总电流幅度最大的 S-Bowtie 天线在 20 MHz 处的增益系数最大, 而单臂长度为 1.875 m 的 F-Bowtie 天线对折使部分电流反向, 导致其 20 MHz 处的增益系数低于单臂长度为 0.9 m 的 DH-Bowtie 天线。

按最低 30% 的加载效率计算, DH-Bowtie 天线加载后的低频端增益为 -3.5 dBi, 优于现有低频小型化天线, 几种天线长度和低频端增益的对比结果如表 1 所示。

表 1 几种天线长度和低频端增益对比结果

天线类型	长度/ $\lambda_l$	低频端增益/dBi
DH-Bowtie	0.12	-3.5
文献[27]	0.25	-3.8
文献[28]	0.12	-16.9
文献[29]	0.096	-13.9
文献[30]	0.14	-12.6

## 2.2 电阻加载设计

在探地雷达应用中, 为了获得较高的分辨率, 以及减小“延迟振铃”效应<sup>[1]</sup>对地下浅层目标回波的干扰, 通常需要天线具有较宽的阻抗带宽, 而电阻加载技术就是目前工程上常用的拓展天线阻抗带宽的方法之一<sup>[31]</sup>。电阻加载技术有集中式加载<sup>[32]</sup>和分布式加载<sup>[8]</sup>两种方式, 由于分布式加载能够获得比集中式加载更宽的阻抗带宽, 所以在工程上得到更广泛的应用。

文献 [8] 将半波对称天线上的电流分布假定为无反射的电流行波分布, 通过求解波动方程得到天线上各点处的分布阻抗, 从而为分布式电阻加载奠定了理论基础。Wu-King 加载公式为:

$$z^i(z) = \frac{15\psi}{h-|z|} \quad (3)$$

式中,  $z^i$  为天线上某点的阻抗;  $z$  为天线上的位置;  $15\psi$  为与天线特性阻抗相关的常数;  $h$  为天线单臂长度。

式 (3) 中的  $\psi$  是未知常数, 导致 Wu-King 加载公式不能直接应用。为了得到 Wu-King 电阻加载的应用公式, 将加载电阻等效为某点的阻抗, 基于式 (3) 按等间距加载建立下式:

$$R_i = \frac{R_0}{l - \frac{i}{n+1}l} = \frac{R_0}{l} \frac{n+1}{n+1-i} \quad (4)$$

式中,  $R_i$  为第  $i$  个加载电阻;  $i$  的取值范围为  $1 \sim n$ ;  $R_0$  为与天线特性阻抗相关的常数;  $l$  为天线单臂长度;  $n$  为加载电阻个数。将  $i=1$  代入式 (4), 得到包含未知数  $R_1$  的常数  $R_0/l$  的表达式, 再回代入式 (4), 即可得到其余加载电阻与  $R_1$  的对应关系式:

$$R_i |_{i=2 \sim n} = \frac{n}{n-i+1} R_1 \quad (5)$$

这样就可以根据加载电阻个数  $n$  采用迭代法确定所有加载电阻阻值,  $n$  的取值可由目标阻抗带宽确定。

虽然式 (5) 是按等间距加载推导出来的, 但是当  $n$  的取值足够大时就能根据式 (5) 确定天线上任意点的加载电阻阻值, 所以式 (5) 可以作为通用的 Wu-King 电阻加载应用公式。

Wu-King 加载对拓展阻抗带宽和减小振铃效应具有良好的效果, 但是存在加载效率低的问题。为了提高加载效率, 文献 [33] 通过理论分析指出高效电阻加载的实质是在拓展阻抗带宽的同时减小加载电阻阻值。

为了实现高效电阻加载, 本文在 Wu-King 加载的基础上提出一种“宽带加载, 局部优化 (BLLO)”的高效电阻加载实现方法, 其核心思路是通过增加式 (5) 中  $n$  的取值获得大于目标阻抗带宽的加载带宽, 以达到减小分布电流在较大处加载电阻阻值的目的, 再通过局部优化 (将加载带宽优化至目标阻抗带宽) 进一步减小加载电阻阻值。

图 5 是依据式 (5) 计算得到的不同  $n$  值对应的不同位置加载电阻相对  $R_1$  的比例系数, 由图可

知，靠近馈电点分布电流较大位置处（ $i$  值较小处）的加载电阻相对  $R_1$  的比例系数随  $n$  值增大而减小。

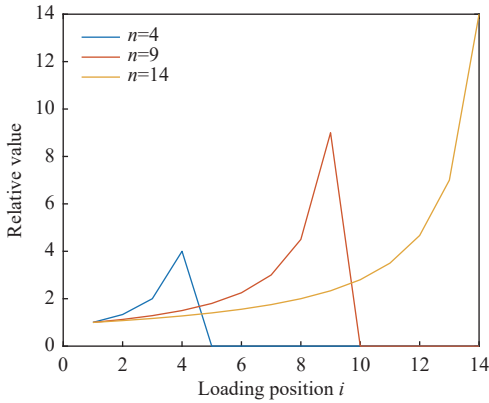


图 5 不同  $n$  值对应的加载电阻比例系数

为了证明 BLLO 方法的加载效率优于 Wu-

King 加载，将目标阻抗带宽（回波损耗小于  $-10$  dB 的带宽）设置为  $20 \sim 140$  MHz，利用高频电路仿真软件 ADS 建立如图 6 所示的等间距宽带电阻加载仿真模型，其中，加载电阻个数  $n$  设置为 9，第 1 个加载电阻  $R_1$  的初值设置为  $0 \Omega$ ，其余加载电阻的阻值由式 (5) 确定，迭代步进设置为 5，并用 10 段长度为 375 mm 宽度为 1 mm 的开路微带传输线模拟 20 MHz 半波对称天线。

利用 ADS 提供的参数扫描功能迭代 3 次后得到当  $R_1$  为  $15 \Omega$  时的仿真结果如图 7 所示，由图可知：1) 用 9 个加载电阻将开路微带传输线等分成 10 段后，回波损耗的波形出现 10 个谐振点（波形中的波谷），即加载带宽与加载电阻个数成正比；2) 用 9 个加载电阻得到远大于目标阻抗带宽的加载带宽（ $20 \sim 270$  MHz），达到“宽带加载”的目的。

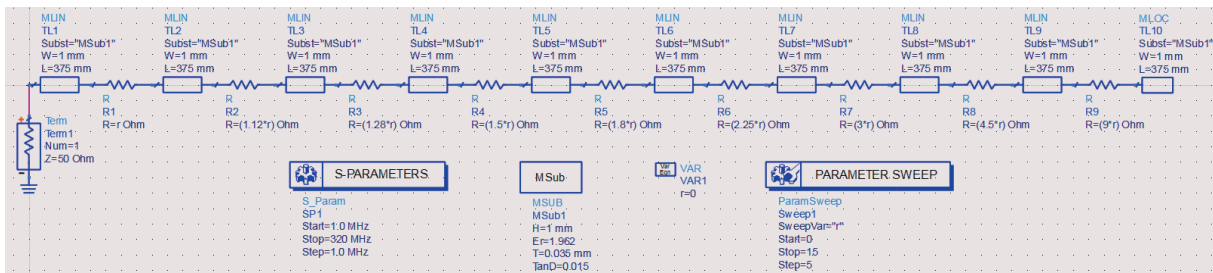


图 6 等间距宽带电阻加载仿真模型

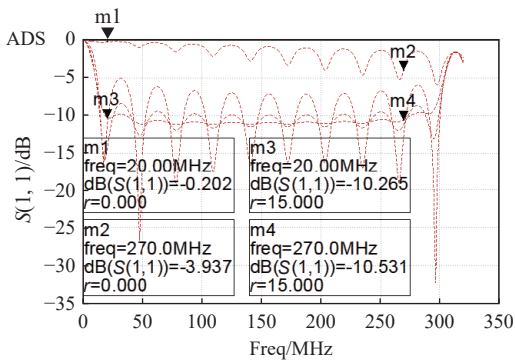


图 7 等间距宽带电阻加载仿真结果

利用 ADS 提供的优化工具将  $20 \sim 270$  MHz 的加载带宽优化至  $20 \sim 140$  MHz 的目标阻抗带宽，优化后的仿真结果如图 8 所示。

为了比较 BLLO 方法与 Wu-King 加载的加载效率，将两种方法的加载电阻阻值（单位为欧姆）和加载损耗（无量纲）列于表 2，其中，加载位置由加载电阻序号表示，不同加载位置的归一化分布电流（无量纲）由式 (1) 计算得到，加载损耗由电

流平方乘以电阻阻值得到。

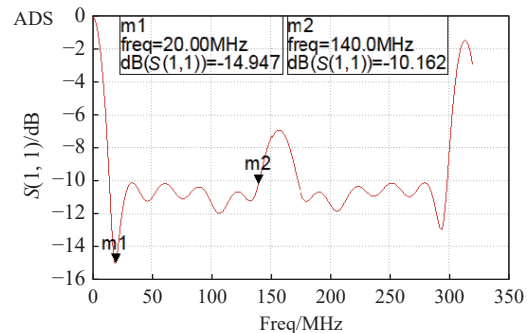


图 8 局部优化后的仿真结果

假定 Wu-King 加载的加载效率为 50%，则表 2 数据对应的总功率为  $104.25/0.5=208.5$ ，由此计算得到的 BLLO 加载效率为  $(208.5-75.73)/208.5 \approx 63.68\%$ ，比 Wu-King 加载高 13.68%。由表 2 可知，局部优化后的多数 BLLO 加载电阻阻值较 Wu-King 加载进一步减小，从而实现高效电阻加载。

表2 两种电阻加载方法的加载损耗比较

加载位置	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	加载总损耗
归一化分布电流	0.99	0.95	0.89	0.81	0.71	0.59	0.45	0.31	0.16	—
Wu-King 加载阻值	15.00	16.80	19.20	22.50	27.00	33.75	45.00	67.50	135.00	—
Wu-King 加载损耗	14.70	15.16	15.21	14.76	13.61	11.75	9.11	6.49	3.46	104.25
BLLO 加载阻值	5.60	15.00	5.60	24.00	15.00	36.00	33.00	80.00	80.00	—
BLLO 加载损耗	5.49	13.54	4.44	15.75	7.56	12.53	6.68	7.69	2.05	75.73

为了将 BLLO 方法应用于 DH-Bowtie 天线, 利用 HFSS 仿真得到其最低谐振频率 (如图 9 所示) 为 61 MHz ( $\lambda/4$  对应的物理长度为 1 229.5 mm), 然后将 DH-Bowtie 天线的双臂按每段长 122.95 mm 等分为 10 段, 其中, 蝶形辐射导体按实际长度 850 mm 等分, 线形折叠辐射导体按  $1\ 229.5-850=379.5$  mm 的总长度按比例等分, 最后按表 2 所列加载电阻阻值完成 DH-Bowtie 天线的高效电阻加载。

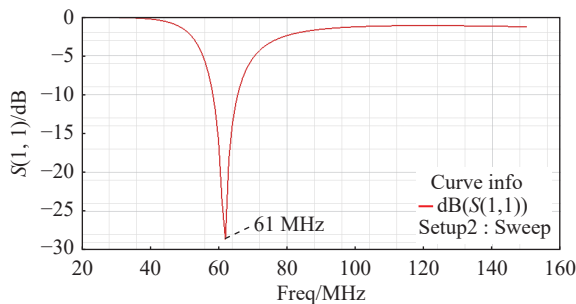


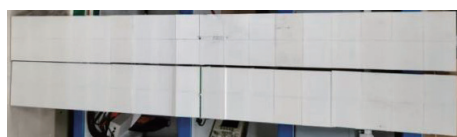
图9 DH-Bowtie 天线最低谐振频率仿真结果

### 3 天线测试

制作完成的 H-Bowtie 天线实物和 BLLO 加载后的 DH-Bowtie 天线实物如图 10 所示, 为了测试和应用方便, 将天线固定在尺寸为 1 800 mm×200 mm×10 mm 的木板上。



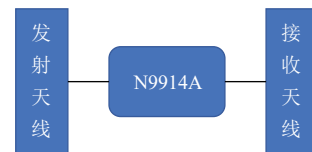
a. H-Bowtie 天线实物



b. BLLO 加载后的 DH-Bowtie 天线实物

图10 电阻和介质加载前后的 HFDP A 天线实物

为了验证 BLLO 方法减小振铃效应的效果, 如图 11 所示 (发射天线和接收天线为同一类型天线), 使用射频分析仪 N9914A 内置的矢量网络分析仪 (vector network analyzer, VNA) 功能对 H-Bowtie 天线、BLLO 加载 H-Bowtie 天线和 BLLO 加载 DH-Bowtie 天线的  $S_{21}$  参数进行了测试, 并利用 N9914A 内置的频时变换功能将  $S_{21}$  测试结果进行了频域到时域的变换, 得到不同时延接收回波的时域波形, 变换结果如图 12 所示。

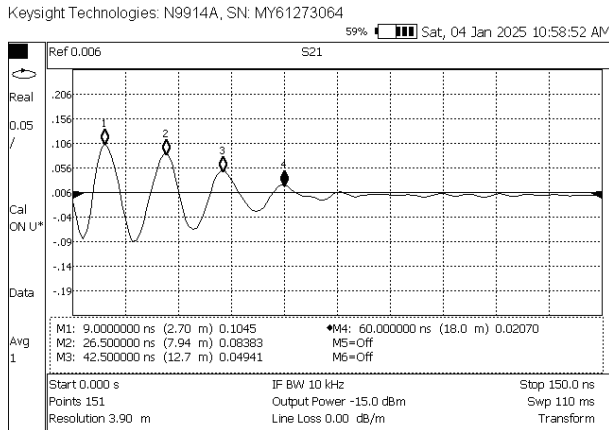
图11 天线  $S_{21}$  参数测试示意图

对比图 12b 和图 12a 所示变换结果可知, 电阻加载后, 位于时间轴上的第 1 个正峰值 (收发天线的直达路径信号, 即直达波) 略有减小, 第 2 个正峰值 (测试环境的地面回波和直达波振铃信号的叠加信号) 明显减小, 第 3 个正峰值 (测试环境的其他回波和直达波振铃信号的叠加信号) 急剧减小。因为测试条件相同, 所以可以证明 BLLO 方法对减小延迟振铃效应具有较为明显的效果。

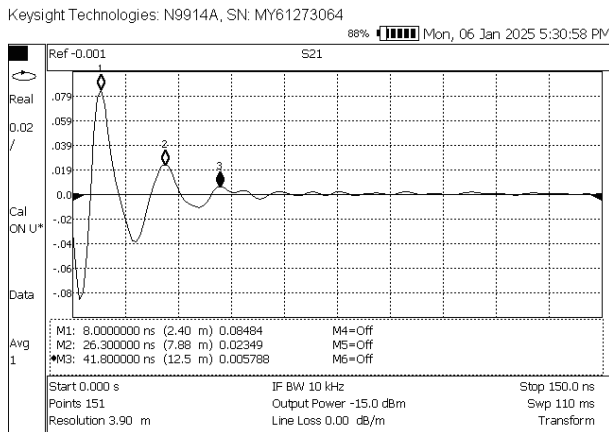
对比图 12c 和图 12b 所示变换结果可知, 介质加载后, 位于时间轴上的第 2 和第 3 个正峰值的时延明显增加, 证明介质加载有效增加了天线的等效电长度。

为了进一步验证 BLLO 加载 DH-Bowtie 天线应用于探地雷达系统时减小振铃效应的效果, 采用基于 VNA 的步进频率连续波 (stepped frequency continuous wave, SFCW) 探地雷达原理样机开展了对比探测实验, 实验天线分别为电阻加载后的 DH-Bowtie 天线和  $-10$  dB 回波损耗带宽为 30 ~ 140 MHz, 尺寸为 2 115 mm×165 mm×85 mm 的蝶

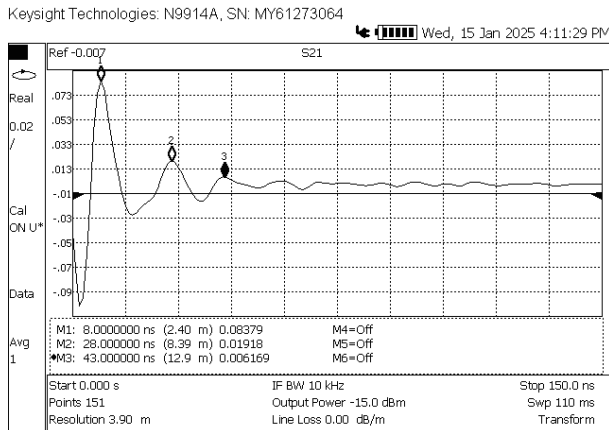
形偶极子圆弧面共形天线。



a. H-Bowtie天线变换结果



b. BLLO加载H-Bowtie天线变换结果



c. BLLO加载DH-Bowtie天线变换结果

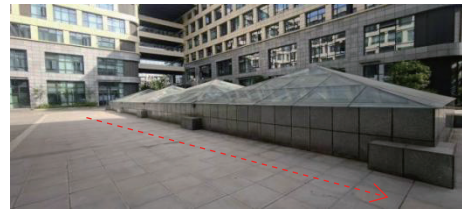
图 12 电阻和介质加载前后 HFDPA 天线 S21 参数频时变换结果

实验场景（成都理工大学综合实验大楼地下停车场）如图 13 所示，雷达收发机和天线由人工抬举，天线离地高度约 1 m，对比试验的测线路径如图 13 中红色箭头所示，测线从实验大楼门外开始，沿图 13a 中红色箭头方向前进，围绕图 13b 中

玻璃顶地下停车场转一圈后，于图 13b 中红色箭头顶点处停止，测线成像结果如图 14 所示。



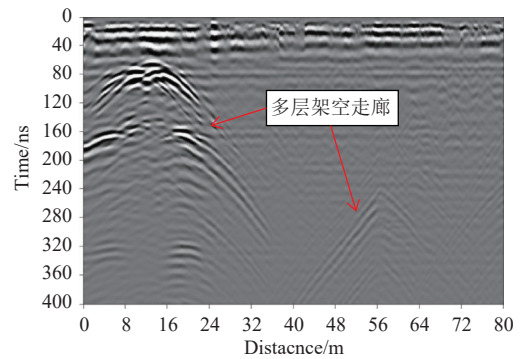
a. 实验大楼入口



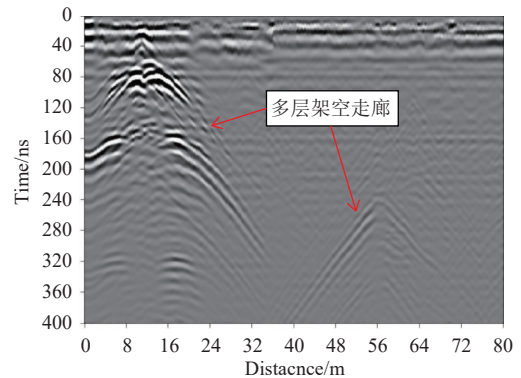
b. 地下停车场

图 13 地下停车场对比试验场景

从图 14 中红色箭头所指两处多层架空走廊的成像结果（图 13b 中的架空走廊离雷达距离较远，故成像结果较尖锐，且回波时延较大）可以看出，与回波损耗性能较好的蝶形偶极子圆弧面共形天线一样，BLLO 电阻加载后的 DH-Bowtie 天线不存在明显的振铃效应，进一步证明了 BLLO 方法对减小振铃效应的效果。



a. 共形天线成像结果



b. DH-Bowtie天线成像结果

图 14 地下停车场对比试验成像结果

## 4 无人机挂载飞行试验

为了验证 DH-Bowtie 天线应用于无人机的挂载性能, 在野外某处滑坡点进行了无人机挂载飞行实验。

实验采用的无人机为大疆 T60 型植保机, 天线挂载方式如图 15a 所示, 试验场景如图 15b 所示, 沿图 15b 中的梯田进行了自上而下离地(梯田最高处) 30 m 的等高飞行试验, 无人机在飞行过程中一直保持平稳的飞行姿态, 证明了 DH-Bowtie 天线易于无人机挂载, 试验成像结果如图 15c 所示。

如图 15b 中的红色虚线段所示, 由于天线辐射的电磁能量是向空间发散的, 所以无人机的飞行高度越高, 照射到地下目标的电磁能量就越小, 即雷达的穿透距离越小。

图 15c 中的红色箭头标示了无人机等高飞行过程中反映地形变化的地表回波信号图像, 从图像的纵坐标可以估算出梯田的最高处(时延 200 ns) 和最低处(时延 360 ns) 高差约为  $(360-200) \times 0.3/2 = 24$  m (自由空间的电磁波速按 0.3 m/ns 计算)。

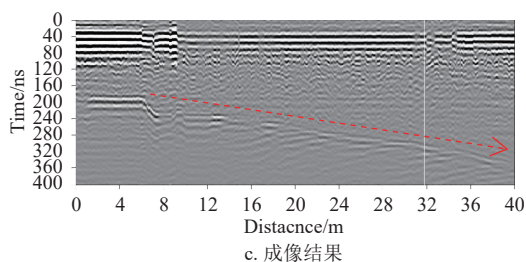
天线离地 50 m 以上仍然能接收到地表回波信号, 说明 DH-Bowtie 天线具有较强的辐射能力。



a. 天线挂载方式



b. 试验场景



c. 成像结果

图 15 无人机挂载飞行试验

## 5 结束语

为了满足无人机载探地雷达空耦天线对低频率、小尺寸和高增益的需求, 利用线形偶极子天线易于折叠和蝶形偶极子天线高增益的优点, 提出一种由线形折叠偶极子天线和蝶形偶极子天线组成的新型低频小型化探地雷达空耦天线——混合折叠偶极子贴片天线, 通过对天线尾部分布电流较小的线形辐射导体进行折叠以及采用高介电常数、低介质损耗材料覆盖天线辐射导体的介质加载, 在减小天线物理长度的同时, 增加了折叠天线的等效电长度, 使物理长度大幅减小的折叠天线具有与标准半波天线相近的低频增益性能。

为了在减小天线振铃效应的同时降低电阻加载损耗, 根据经典 Wu-King 加载公式推导出 Wu-King 电阻加载应用公式, 并在此基础上提出一种能够减小加载损耗的“宽带加载, 局部优化 (BLLO)” 高效电阻加载实现方法。

设计完成的天线尺寸为  $1\ 800\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ , 最低工作频率为 20 MHz, 天线长度是标准半波天线的 24%。与 20 MHz 标准半波天线的对比仿真结果证明了提出天线具有与标准半波天线接近的低频增益性能。

与 Wu-King 电阻加载的对比计算结果证明了 BLLO 电阻加载具有比 Wu-King 加载高 13.68% 的加载效率, 天线振铃效应测试结果证明了 BLLO 电阻加载具有较好的减小振铃效应的效果, 从而为低频探地雷达空耦天线的小型化设计提供了一种新的思路和有益参考。无人机挂载飞行试验结果证明了提出天线满足无人机挂载的应用需求。

**致谢:** 感谢中国科学院空天信息创新研究院提供 30 ~ 140 MHz 轻量化蝶形偶极子圆弧面共形天线。

## 参考文献

- [1] LESTARI A A, YULIAN D, LIARTO, et al. Theoretical and experimental analysis of a rolled-dipole antenna for low-resolution GPR[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Ultra-Wideband. [S.l.]: IEEE, 2007: 294-298.
- [2] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- XIE C F, RAO K J. Field and wave electromagnetics[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.

- [3] CAO P, HUANG Y, ZHANG J W. A UWB monopole antenna for GPR application[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. [S.l.]: IEEE, 2012: 2837-2840.
- [4] SUBRAHMANYAM G V, KRISHNA K S, RAKESH Y. A square shape notched UWB antenna for GPR applications[C]//Proceedings of the IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium. [S.l.]: IEEE, 2022: 1-4.
- [5] HASAN M N, SEO M. A Planar 3.4-9 GHz UWB monopole antenna[C]//2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Busan: [s.n.]: 2018: 1-2.
- [6] PRASAD P, SINGH S, KUMAR A. A wheel shaped compact uwb antenna for gpr applications[C]//2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India: [s.n.], 2021: 1-5.
- [7] 张彦婷, 林文斌, 唐晋生. 用于探地雷达的超宽带单极子天线设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(15): 65-68.  
ZHANG Y T, LIN W B, TANG J S. Ultra-wideband monopole antenna design for ground penetrating radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(15): 65-68.
- [8] WU T T, KING R W. The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1965, 13(3): 369-373.
- [9] JENKS H, PENNOCK S R, REDFERN M A, et al. Novel loop and dipole based UWB antennas for GPR and communication applications[C]//Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation. Prague: IEEE, 2012: 2832-2836.
- [10] 吴秉横, 纪奕才, 方广有. 一种新型探地雷达天线的设计分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1487-1489.  
WU B H, JI Y C, FANG G Y. Design and analysis of a novel GPR antenna[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2009, 31(6): 1487-1489.
- [11] LOIZOS A, PLATI C. Accuracy of ground penetrating radar horn-antenna technique for sensing pavement subsurface[J]. *IEEE Sensors Journal*, 7(5): 842-850.
- [12] MOHAMED H A, ELSADEK H, ABDALLAH E A. Quad ridged UWB TEM horn antenna for GPR applications[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Cincinnati: IEEE, 2014: 79-82.
- [13] KOLOKOTRONIS D A, HUANG Y, ZHANG J T. Design of TEM horn antennas for impulse radar[C]//Proceedings of the MTT/ED/AP/LEO Societies Joint Chapter United Kingdom and Republic of Ireland Section. 1999 High Frequency Postgraduate Student Colloquium. [S.l.]: IEEE, 1999: 120-126.
- [14] FANG G Y. New design of the antipodal Vivaldi antenna for a GPR system[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, 44(2): 136-139.
- [15] 王百泉, 董可欣, 刘昌斌, 等. 用于衬砌探测的空气耦合探地雷达天线设计[J]. 测试技术学报, 2023, 37(1): 79-86.
- WANG B Q, DONG K X, LIU C B, et al. Design of air-coupled ground penetrating radar antenna for Lining detection[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2023, 37(1): 79-86.
- [16] 殷晓星, 王群, 王春和, 等. 一种探地雷达用的渐变槽线加载天线[J]. 现代雷达, 2006, 28(11): 58-60.
- [17] DOKJOK N, THAIWIROT W, BOONPOONGA A, et al. A wideband printed slot antenna using double feed and blended stub with reflector for GPR applications[C]//2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Busan: [s.n.], 2018: 1-2.
- [18] WU B H, JI Y C, FANG G Y. 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.
- [19] NAYAK R, MAITI S, PATRA S K. Design and simulation of compact UWB Bow-tie antenna with reduced end-fire reflections for GPR applications[C]//2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). Chennai: IEEE, 2016: 1786-1790.
- [20] SENAPATI H S, CHONGDER P, AJITH K K, et al. Design of UWB bow tie antenna for GPR object detection[C]//2021 Advanced Communication Technologies and Signal Processing (ACTS). Rourkela: IEEE, 2021: 1-4.
- [21] 梁平乐, 樊易航, 刘溢成, 等. 一种低频超宽带脉冲探地雷达天线设计[J]. 现代应用物理, 2023, 14(3): 193-199.  
LIANG P L, FAN Y H, LIU Y C, et al. The antenna design of a low-frequency UWB pulse GPR[J]. *Modern Application Physics*, 2023, 14(3): 193-199.
- [22] 彭宇, 王蕾, 郭福强, 等. 一种超宽带小型化探地雷达天线的设计[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 750-753.  
PENG Y, WANG L, GUO F Q, et al. Design of a UWB miniaturized GPR antenna[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(4): 750-753.
- [23] 李雪萍, 纪奕才, 卢伟, 等. 超宽带低背腔车载探地雷达收发天线的研究[J]. 电子学报, 2014, 42(8): 1577-1581.  
LI X P, JI Y C, LU W, et al. Research on an UWB transmitting/receiving antenna with shallow backed cavity mounted on a vehicle for GPR application[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2014, 42(8): 1577-1581.
- [24] 吴秉横, 纪奕才, 方广有. 带反射腔的分布式电阻加载探地雷达天线设计与分析[J]. 雷达学报, 2015, 4(5): 538-544.  
WU B H, JI Y C, FANG G Y. Design and analysis of the distributed resistor-loading GPR antenna with reflected cavity[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(5): 538-544.
- [25] 吴彦奇, 刘四新. 一种基于吸波材料的屏蔽领结天线的研究与应用[J]. 电波科学学报, 2018, 33(2): 132-137.

- WU Y Q, LIU S X. A shielded bow tie antenna based on absorbing material[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2018, 33(2): 132-137.
- [26] 尹诗, 郭伟. 用于探地雷达的超宽带天线设计与仿真[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(3): 98-102.
- YIN S, GUO W. Design and simulation of UWB antenna applied to ground penetrating radar[J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(3): 98-102.
- [27] FANG G Y, PIPAN M. Designing of a low frequency ultra wide band(UWB) antenna and its application in ground penetrating radar(GPR) system[C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Grounds Penetrating Radar*. Delft: [s.n.], 2004: 109-111.
- [28] KIM W, LEE M S, SHIN G, et al. Ferrite-loaded, low-profile grounded bowtie-loop antenna for VHF communication[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(12): 3132-3136.
- [29] 张成见. 面向车载卫通的 UHF/VHF 小型化天线研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.
- ZHANG C J. Research on UHF/VHF mini-aturized antenna for vehicular satellite communication[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.
- [30] 俞令伟. VHF/UHF 探地雷达天线的小型化与增益增强方法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
- YU L W. Research on miniaturization and gain enhancement of VHF/UHF antennas for ground penetrating radar application[D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [31] SCHANTZ H. 超宽带 (UWB) 天线原理与设计[M]. 吕文俊, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- SCHANTZ H. The art and science of ultra- wideband antennas[M]. translated by LYU W J. Beijing: Posts and Telecom Press, 2012.
- [32] ALTSHULER E. The traveling-wave linear antenna[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1961, 9(4): 324-329.
- [33] 郭玉春, 史小卫. 高效电阻加载天线理论研究[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(2): 276-280.
- GUO Y C, SHI X W. Theoretical study of high efficiency resistive loading antenna[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(2): 276-280.

编辑 税红