

# 利用波长变换理论的 ELF 天线设计及仿真

邓小涛<sup>1,2</sup>, 江帆<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学 电子工程学院通信工程系, 湖北 武汉 430033;

2. 海军通信应用研究中心, 北京 100841;

3. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 为了克服超长波天线建设困难、发射效率低下这一大难点, 根据电磁波在不同介质中的波长变换原理, 提出了在变介质中构建超长波发射天线的方法, 使得超长波在介质中的电长度大大缩短, 从而大幅度降低发射天线的设计难度, 使天线高效辐射极低频信号成为可能。通过理论分析, 得出了该设计的正确性, 并根据功能性仿真试验, 验证了变介质超长波发射天线的辐射性能。

**关键词:** 极低频; 天线; 变介质; 发射

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

## Design and simulation of ELF antenna based on the wavelength conversion theory

DENG Xiao Tao<sup>1,2</sup>, JIANG Fan<sup>3</sup>

(1. Department of Communication Engineering Institute of Electronic Engineering,

Naval Engineering University, Wuhan 430033, China;

2. Naval Research Center of Communication, Beijing 100841, China;

3. Institute of Weapon Engineering, Naval Engineering University, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** To overcome the difficulty of ELF antenna building and low transmitting efficiency, this paper brings forward a new different medium antenna building method which uses the theory of wavelength transmission. This method reduces the electronic wavelength of the ELF in the medium, so the difficulty of ELF transmitting antenna building is greatly simplified. At the same time the antenna transmitting efficiency is increased. We prove the validity of this method by theory analysis. Finally, according to the performance simulation experimentation, we testify that the ELF antenna in different medium gains a great increasing in the transmitting efficiency.

**Key words:** ELF; antenna; different medium; transmit

超长波通信是各国争相研究的重要通信手段之一, 主要应用于远距离的可靠通信 (这时数据率低不是主要, 而可靠性是主要问题), 还应用于远距离甚至全球的无线电导航、标准频率和时间信号的广播、低电离层研究、雷暴定位以及对水下潜艇的通信等。特别是海军对水下潜艇的通信, 由于海水对电波的强大吸收作用, 采用超长波通信几乎成为唯一的手段。

ELF 波段 (30 Hz~300 Hz) 无线电波主要有以下几个优点<sup>[1-2]</sup>: (1) 对地下岩层和海水的穿透能力强; (2) 传播衰减小, 作用距离远, 甚至达到全球; (3) 传播相位稳定, 且有良好的可预测性; (4) 受电离层扰动的影响小, 传播情况稳定。同时, 超长波通信具有隐蔽性好、信道稳定可靠、抗截获抗干扰能力强、抗毁和抗核爆能力强等突出优点, 因此可望成为战争中最后的通信手段。

但超长波通信也存在一些明显的缺点: 带宽窄、传输速率极低, 只能达到每秒几个比特, 仅仅能传输一些最基本的信息, 很难满足信息化战争指挥控制的需要; 该波段的天电干扰和工业干扰都十分严重, 接收端的信噪比极低; 需要庞大的发射天线, 设备非常昂贵, 且天线效率低下, 信号衰减大。

为了解决超长波通信系统传输速率低和弱信号接收困难这些固有的难点, 主要从两个方面入手: (1) 精心设计和架设天线, 通过合理的天线架设, 提高天线的发射效率; (2) 研究设计新型的适合超长波通信特点的调制编码制度, 目的是在低信噪比条件下大幅度提高传输效率。本文主要研究了设计和架设天线的新思路, 并且通过试验验证得到了可喜的结果。

## 1 超长波天线设计现状

在无线电通信领域中,要构成有效的发射系统,就应该使发信系统的天线长度接近所发信号的波长。否则,发射天线就不能形成有效的电波辐射。极低频(30 Hz~300 Hz)是指波长在 1 000 km~10 000 km 范围内的无线电信号。极低频的波长如此之大,不难看出:要想构成具有较高辐射能力的极低频发射系统,就需要有一个伸延上千公里的极其庞大的发信天线场。例如,美国原计划建设的桑格文极低频发信台初期天线系统的设计规模,约占地 7 766(km)<sup>2</sup>,其整个天线系统的长度在 8 045 km 以上,如此巨大规模的天线系统,预计投资在 10 亿美元以上,以致美国不得不再搁浅该计划;前苏联在科拉半岛建造永久性的发射台,选用 30 Hz~200 Hz 频段工作,2 根发射天线相互平行,各长 60 km,两端接地,彼此相距 10.5 km,各有一部发射机,由一个总控制台控制,发射机功率为兆瓦级,其所需的巨额投资也可想而知。通常情况下,极低频天线系统所需资金,将占据整个极低频发信系统总投资中的绝大部分,并且,维护负担将十分繁重。

另外,极低频发射系统天线场的选址条件也十分苛刻。其发射天线场的基本选址原则是<sup>[3]</sup>:极低频发射天线场区,应该定址在具有很低电导率的区域。理想的极低频发射天线场址,是具有前寒武纪花岗岩构成的劳伦地盾区域。这就是说,极低频发信系统应该建设在符合特定地质条件的区域内。

## 2 超长波(ELF)发射天线设计

由电磁波传播理论可知,无线电波在不同介质中传播时,其波长是不同的。其波长与传播介质的电参数密切相关。例如,无线电波在空中传播时的波长,可以近似表示为:

$$\lambda = 3 \times 10^8 / f \quad (1)$$

而其在海水中传播时的波长则近似为:

$$\lambda = 1581 / f^{1/2} \quad (2)$$

其中: $\lambda$  的单位为 m, $f$  的单位为 Hz。

根据公式(1)、(2),可以得出如下推断:对于频率为 100 Hz 的无线电波来说,它在空气中的波长大约为 3 000 km。但是,在海水中的波长大约只有 158 m 左右。由此可见,对于同样频率的无线电波来说,当它在不同的介质中传播时,其波长会有巨大的差别。这给笔者以很大的启发,如果能够利用这一现象,在海水中构成极低频发信天线,则只需架设几百米的天线,即可达到极低频信号有效辐射的电长度了。如果在陆地上,达到同样的辐射电长度,就必须架设上千公里长的天线。可想而知,在海水中架设几百米长的天线,与在特定地质区域内架设上千公里长的陆基天线相比,所要花费的代价必定会小得多。可以说,这种极低频对潜发信系统的设计构想,必定可以降低极低频天线的建设难度及建造费用,这对于开展我国极低频通信系统的应用研究具有十分重要的意义。

现在,就从极低频的辐射和传播入手,对这种发射方式的辐射和传播情况,进行简要的分析,以说明其可行性。

由电磁波传播理论可知,当电磁波在海水中传播时,会受到衰减。其衰减量与电磁波的频率密切相关。这种传播衰减与频率关系的统计平均值可由下式表达:

$$a(f) = 0.0345 \times f^{1/2} (\text{dB/m}) \quad (3)$$

假定电磁波在水下传至水面的传播距离为  $d(\text{m})$ ;其总衰减量为  $A(\text{dB})$ ,则有:

$$A = a(f) \times d \quad (4)$$

其中:频率  $f$  的单位为 Hz,传播距离  $d$  的单位为 m。

若电磁波频率为 25 Hz,则  $a(f) = 0.1725 \text{ dB/m}$ 。如果在水下 20 m 深处架设极低频天线,则电磁波在水下传至水面的衰减量  $A = 3.45 \text{ dB}$ 。假设水下极低频系统向上辐射出 100 kW (即 80 dBm) 的信号,则经过 20 m 的传播,当它到达水面时,就被衰减为 76.55 dBm。当然,这 76.55 dBm 的信号,不可能完全穿透水面。在它穿越水面时,有相当一部分信号能量,在海水与空气这两种传播介质的交界处被反射。只有一部分信号能量能够穿越这个界面。从最不利的角度来看,海水与空气界面的反射衰减大约为 40 dB。于是,能够穿透海水进入大气的信号能量,大约只有 36.55 dBm。也就是说,当在海水深度 20 m 处向上辐射 100 kW 的信号时,大约会有 4 W 左右的信号被射入大气之中。该信号的强度,与美国海军现役极低频发信台所能辐射出的信号强度(2 W~8 W)的平均值相当。但是,美国现役极低频发信系统的天线长度大约为 135 km(其中:大约有 45 km 在克莱姆湖;90 km 在密执安州北部半岛上)。而只需架设几百米长的天线,就可到达同样的发射效果。

## 3 天线性能对比分析

从幅射效率来看,美国现役 ELF 发信台的发射机功率接近 2 MW。但是,其实际辐射出的功率大约只有 2 W~4 W。如果按照 2 W 计算,其辐射效率只有  $2 \text{ W} / 2 \text{ MW} = 10^{-6}$ ,即辐射损耗为 60 dB。其辐射损耗如此之大,是因为其发射天线的电长度远未达到 ELF 的有效辐射长度所致。

当发信天线架设于水中时,只需几百米长就可以达到 ELF 有效辐射的电长度。如果假设其辐射效率为 50% (辐射损耗为 3 dB),加上信号传至水面的衰减 3.45 dB,水面反射损耗 40 dB,就得到水下发射的总衰减约为 46.45 dB。这个衰减远小于美国现役 ELF 发射台(60 dB)的辐射损耗。

从辐射 4 W 信号所需的 ELF 发射机功率来分析。假设水下天线向上辐射 100 kW 的信号,向上辐射信号仅占总能量的 25%。这样,天线总共要辐射出 400 kW 的信号。又因为已假定辐射效率为 50%,于是发射机功率应为 800 kW (如果取 80% 的辐射效率,则只需 500 kW 的发射机)。由此可见,采用水下发射方式,只需架设数百米

的天线和 800 kW 的发射机,就可以达到美军使用 2 MW 的发射机并且必须架设上百公里天线才能达到的通信效果。

从对潜通信深度上看,美军现役 ELF 系统以 2 W~4 W 实现了百米深级的对潜通信。现以 4 W (36 dBm),可通深度 100 m 为基准,用类比方法分析水下 ELF 系统以 800 kW 和 10 kW 发射机所能达成的通信深度。

美军 ELF 系统的标准工作频率为 76 Hz (亦可工作于 44 Hz)。由电磁波在海水中的衰减公式(3)可知,频率越低,信号衰减就越小,若取对美方有利的频率 44 Hz,其衰减  $\alpha=0.229$  dB/m,则在海水中传播 100 m 的衰减  $A=22.9$  dB。由此可知,可以达成对潜通信的类比参照基准应为:

$$S=36\text{ dBm}-22.9\text{ dBm}=13.1\text{ dBm}$$

现在,就以此电平( $S=13.1$  dBm)为比较基准,分析水下发射系统的对潜通信深度。假设其工作频率为:  $f=25$  Hz,其在海水中的衰减  $\alpha=0.1725$  dB/m。

对于 800 kW (即 89 dBm)的发信系统来说,可以向空中辐射出 4 W (即:36 dBm)的信号。它可能达成的通信深度为:

$$D=(36-13.1)/0.1725=132(\text{m})$$

若发信机功率为 10 kW (70 dBm),可能达成的通信深度为:

$$D=[36-(89-70)-13.1]/0.1725=22.6(\text{m})$$

在前边的分析中,假定水下天线的辐射效率为 50% (即辐射损耗 3 dB)。如果水下天线的辐射效率为 75%~85%。现取其为 80% (即:辐射损耗为 0.969 1 dB,取其为 1 dB)。这样,其有效信号能量就比上述分析时高出约 2 dB。于是,其可达成的对潜通信深度就可增至:

$$D=(2+36-19-13.1)/0.1725=34.2(\text{m})$$

由上分析可知,采用水下发射方式来实现极低频对潜通信是可能的。而且,无论是从极低频发射的有效性上,还是从天线系统的规模上来讲,水下发射的设计思想不仅有效,而且经济小巧,采用这种设计方案可以节省上亿元的天线建设经费。如果这种系统得以实现,必将提高极低频对潜通信的通信质量和性能,极大地促进对潜通信指挥技术手段的进步,进一步增强对潜通信的可靠性。

## 4 仿真试验

经过理论分析后,为了证明这种设想的正确性,在实际环境中进行了功能性仿真试验。首先构建了极低频发射系统和接收系统。发射系统包括发射机和天线,其中发射机采用 UPS 电源实现,由于设备的限制,无法进行精确的性能试验,只是进行了原理验证试验。

### 4.1 ELF 信号发射机

本试验为功能性试验,主要是为了验证水下发射 ELF 信号的可行性,因此只需要选用一个 ELF 频率进行发射试验即可。这里通过改装 UPS 电源电路实现了 35 Hz 的信号发射。发射原理如下:UPS 电源电路其中一个重要的部分就是把直流电转化为 220 V 的交流电,其默认

的交流电频率为 50 Hz。为了避开公用电力系统的干扰,同时也为了不影 响电力系统,不能选用 50 Hz 频率进行水下发射试验。因此将 UPS 电源电路的交流频率进行了调整,调整了决定交流频率的可变电阻,使逆变器输出的电流为 35 Hz 的准正弦信号。

### 4.2 ELF 发射天线

为了得到较好的实验结果,验证水下信号穿透水面传播的可行性,可以在水下布设一定长度的电缆作为简单的超低频水下发射天线。

### 4.3 ELF 接收天线<sup>[4]</sup>

接收天线内部由不同宽度的钹模合金条组成,横截面基本呈圆形,外部由塑封管固定封装,再由电感线圈缠绕在塑封管上组成接收天线体,电感线圈约为 3000 匝,电感量约为 20  $\mu$ H。如图 1 所示,电感线圈通过并接电容后,谐振频率调整在 35 Hz 左右,天线接收到信号后送入放大器电路。

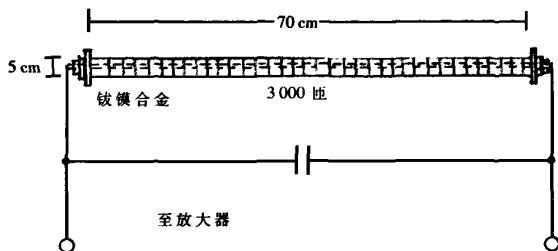


图 1 天线侧视图

### 4.4 仿真结果分析

极低频发射、接收系统构建完成后,对其进行了原理性试验。发射方式为改造 1000 W 的 UPS 充电电路,将输出直接馈入做为天线的水下电缆,信号频率为 35 Hz,每隔 2 s 发送一次,每次持续 2 s。接收方式为海上移动接收。接收到的信号通过场强仪采样数据。记录结果如图 2 所示。可见,由场强仪的记录结果可以很明显地看到超低频信号能够成功穿透水面,并且随着距离天线越远,信号的强度呈下降趋势。

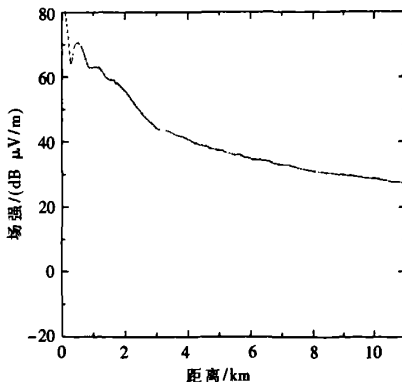


图 2 极低频信号接收场强距离图

(下转第 126 页)

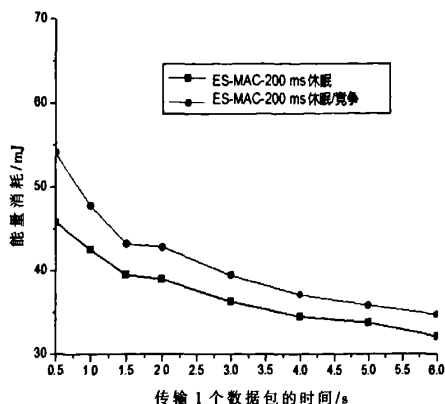


图 6 8 个节点组成的网络中竞争和无竞争情况下发送节点的能耗

降低,但是仍然比没有模式判断位的 ESMAC 协议更能节省能量。

### 3.4 延迟实验

为了体现 ESMAC 协议在延迟方面的改进,需要测量发送节点和接收节点之间的一跳延迟时间。本实验选用 10 个节点,1 个为发送节点,9 个为接收节点,设置发送节点的发送速率为每秒 1 个。第 1 次实验在 ESMAC 协议中不加入模式判断位,第 2 次加入,改变节点的初始化休眠时间分别为 50 ms、100 ms、200 ms、400 ms、600 ms、800 ms 和 1000 ms,分别测得节点间的一跳延迟时间,如图 7 所示。

从图 7 中可以看出 ESMAC 协议比 B-MAC 协议的

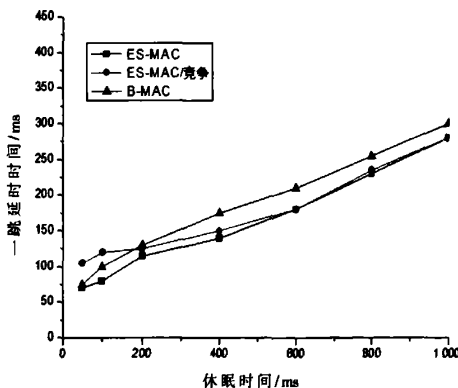


图 7 竞争和非竞争下的一跳延迟时间

延迟要小。随着休眠时间的增大,节点一跳延迟的时间也在增大。在节点休眠时间较短时,竞争造成了延迟时间曲线斜率的增大,但是随着休眠时间的增大,延迟时间曲线变得不是那么陡峭了。由此可以看出 ESMAC 协议在降低竞争的延迟方面的贡献。休眠时间增大到一定时间时,由于网络稀疏,很少出现竞争了。

针对容迟移动传感器网络的特性,提出一种减少节点能量消耗的 ESMAC 协议。通过发送简短的寻访报文,减少节点由于串音和竞争而带来的能量消耗和接入延迟,并且可以根据网络的负载,调整节点的休眠时间,减少由空闲侦听引起的能量消耗,同时减少了数据传输延迟时间。

### 参考文献

- [1] KEVIN F. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets. Sigcomm '03, Karlsruhe, Germany, August 25-29, 2003: 27-34.
- [2] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy efficient mac protocol for wireless sensor networks. In Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies (INFOCOM 2002), June 2002.
- [3] VAN D T, LANGENDOEN K. An adaptive energy efficient mac protocol for wireless sensor networks. In 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), 2003: 171-180.
- [4] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In The Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), November 2004: 95-107.
- [5] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. IEEE Std 802.11-1999, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 1999
- [6] Nordic chipcon CC2420 radios. <http://www.nordicsemi.com>
- [7] SUSHANT J. Routing in a delay tolerant network. Sigcomm '04, Portland, Oregon, USA, Aug. 30-Sept. 2004, (3): 145-158.
- [8] HUI P, CHAINTREAU A, SCOTT J, et al. Pocket switched networks and human mobility in conference environments. in Proceeding of the ACM SIGCOMM workshop on DTN, 2005. (收稿日期: 2009-03-18)

(上接第 121 页)

本文在分析了国外极低频技术发展及极低频发射台建设经验的基础上,开拓思路,利用无线电波长在海水中的缩短规律,大胆提出极低频水下发射的构想,从理论上进行了可行性分析,并构筑试验平台,验证了理论结果,最后给出了建设方案和一些继续研究的方向,为我国极低频通信技术开辟了新的研究途径。

### 参考文献

- [1] 王一平,郭宏福. 电磁波·传输·辐射·传播[M]. 西安:

西安电子科技大学出版社, 2006: 230-235.

- [2] 张瑜. 电磁波空间传播[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 14-15.
- [3] 柳超,王永斌,高俊. 甚低频通信[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2003: 20-21.
- [4] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 823-825. (收稿日期: 2009-06-01)

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>