$$\rho_{x'y'}=\left(\sum_{j=1}^{n}(d_j+d_{j-1})\sqrt{\rho_{x'y'j}}\Big/\sum_{j=1}^{n}(d_j+d_{j-1})\right)^2 \tag{22}$$

其中，d_j 是第 j 个测点到第$(j+1)$个测点之间的距离，$d_0=d_n=0$。假设 MT 测点共 n 个，由第 1 个至第 n 个沿天线依次顺序排列。

5 结论

超低频/极低频水平发射天线的性能与天线所在地的大地视电阻率是密切相关的，本文给出了大地视电阻率的计算方法，并指出应采用沿天线架设方向视电阻率的长度加权平均值来表征天线场地的电特性。值得注意的是本文研究的电阻率是用来计算天线辐射能力的，是某点从地表面看下去非均匀大地呈现的等效电阻率，而不是该点大地地质体材料的等效电阻率。

参考文献

[1]D.Lianwvn, Jones, G P Burke. 1995. ELF radio [J]. 100years of radio 5-7 september conference publicaton 411 IEEE 1995: 101~106

[2] MICHAEL L, BURROWS. Surface Impedance and the Efficiency of Horizontal-Dipole Extremely Low Frequency (ELF) Antenna arrays[C]. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL.COM-22 NO.4 APRIL 1974.

[3]赵国泽.超低频/极低频电磁波技术及其在地震预测研究中的应用潜力和展望[C]. 科技委论坛 No.15. 2000.

柳超（1963-），男，湖南人，教授。

等角螺旋天线测向性能的数值仿真

席晓莉[1]，刘江凡[1]，华军[2]

1、西安理工大学，陕西 西安 710048

2、通信系统信息控制技术国家重点实验室.浙江 嘉兴, 314001

摘要：本文给出了一种等角螺旋天线测向性能的数值仿真分析方法。本文以给定结构的四臂等角螺旋天线为接收天线，采用电磁场数值计算方法仿真了一定方向平面波投射下天线接收端口的开路电压，利用比幅比相方法对投射波的波达方向进行了估计，并对估计结果与实际投射方向间的误差进行了分析，该方法可为多臂螺旋天线测向性能的研究提供极大的方便。

关键词：等角螺旋天线，波达方向估计，比幅比相方法，

Numerical Simulation used for Angle Estimation Performance of Equiangular Spiral Antennas

Xi Xiaoli[1], Liu Jiangfan[1], Hua jun[2]

([1].Xi'an University of Technology, xixiaoli@xaut.edu.cn, Xi'an 710048)

([2].National Laboratory of Information Control Technology for Communication System ,Zhejiang Jjiaxing 314001 China)

Abstract: The electromagnetic Numerical Simulation was used for calculation terminal output voltage of a given structure equiangular spiral antenna, which was used as a receiving antenna and exposed under the plane wave with a certain angle of incidence. Moreover, its model outputs were derived and the angle of arrival was estimated by comparison method from model outputs. The result shows that the estimated angle is accord with the angle of incidence and its errors were discussed in details. The method can effectively simplify the investigation of angle estimation performance for equiangular spiral antenna.

Keywords: Equiangular Spiral Antenna，Angle of Arrival，Comparison Method

1 引言[1]

等角螺旋天线具有频率无关及结构简单的特性，已被广泛应用于宽带、超宽带及多频段信号的接收和发射上[1,2,3]。除了频率无关特性外，等角螺旋天线同时具有单口径测向能力，可应用于载体的被动测向系统。采用等角螺旋天线的两

[1] 本课题获通信系统信息控制技术国家重点实验室资助

个低阶模式实现的四个波束导引技术已在反辐射导弹的被动雷达导引中得到广泛应用，如美国的“百舌鸟”（Shrike）、“哈姆”（HARM）等反辐射导弹的导引[4]。利用等角螺旋天线接收端口模式电压的更高阶模式，可实现单口径天线的宽带被动测向[1,5,6]。

等角螺旋天线的频率无关特性及测向原理是在假设天线半径无限大、螺旋线缠绕紧密及螺旋臂无限多等条件下，通过理论分析得到辐射场及端口接收电压的表达形式而得到的[7,8]。但实际应用的等角螺旋天线不可能满足上述假设，因此，其宽频带特性、辐射场分布及测向特性等均会与理论结果存在一定差异。实际应用的等角螺旋天线的频带、阻抗及辐射场分布等特性均可通过电磁场数值仿真方法把天线作为辐射天线进行分析，而天线的测向特性则只能从接收天线角度进行分析。

本文首先介绍了等角螺旋天线比幅比相测向的理论基础；然后采用数值仿真方法，模拟了以一定角度入射的平面波在等角螺旋天线臂上的端口电压，并计算出对应的模式电压，利用模式电压的幅度比估计入射波的俯仰角，利用相位补偿后的模式电压相位估计入射波的方位角；最后对天线测向的数值仿真结果的误差进行了分析。

2 等角螺旋天线的比幅比相测向原理介绍

2.1 等角螺旋天线的数学模型

等角螺旋天线的臂是由两条螺旋线构成，它们在极坐系中的方程为：

$$\begin{cases}\rho_1=\rho_0 e^{-a\varphi}\\ \rho_2=\rho_0 e^{-a(\varphi-\delta)}\end{cases} \tag{1}$$

$\rho_1\rho_2$ 分别为臂的外边缘及内边缘螺旋线矢径，δ 为臂宽角，ρ_0 为起始极径，φ 为极角，a 为螺旋率，表示螺旋线缠绕的紧密程度，a 越小螺旋线缠绕的越紧密。当相邻两臂之间的空隙与臂的形状完全相同时，天线为自互补结构。

2.2 等角螺旋天线的测向原理[5]

等角螺旋天线作为接收天线时，假设天线放在 XOY 平面上，以（θ,ϕ）角度入射的平面波传播方向的单位矢量可表示为：

$$\hat{u}_i=-\left(\sin\theta\cos\phi\hat{x}+\sin\theta\sin\phi\hat{y}+\cos\theta\hat{z}\right) \tag{2}$$

入射的平面波可表示为：

$$\vec{E}_{inc}=E_0\hat{p}e^{-j\beta\hat{u}_i\cdot\vec{r}} \tag{3}$$

其中 E_0 和 $\hat{p}$ 分别为入射波的幅度和极化方向，$\vec{r}$ 为观察点的位置矢量，$\beta=\dfrac{2\pi}{\lambda}$，$\beta$ 和 λ 分别为入射波在自由空间中的波数和波长。

天线第 m 条臂终端感应的开路电压为 $V_{oc,m}$，端口电压经过模式形成器形成的 n 阶模的模式输出电压可以表示为[5]：

$$M^n=\sum_{m=1}^{N}W_{n,m}V_{oc,m} \tag{4}$$

其中：$W_{n,m}=e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)(m-1)n}$，$N$ 为天线端口总数。

当入射波为 ϕ 极化时，n 阶模模式电压输出为：

$$M_\phi{}^n=E_0\left(\frac{n\lambda}{2\pi}\right)e^{-j\psi_n}\pi e^{-jn\phi}j^{n+1}\left[J_{n+1}(n\sin\theta)-J_{n-1}(n\sin\theta)\right] \tag{5}$$

当入射波为 θ 极化时，n 阶模模式电压输出为：

$$M_\theta{}^n=E_0\left(\frac{n\lambda}{2\pi}\right)e^{j\psi_n}\pi e^{-jn\phi}j^{n}\cos\theta\left[J_{n+1}(n\sin\theta)+J_{n-1}(n\sin\theta)\right] \tag{6}$$

(5) 和 (6) 式中，$J_{n+1}(n\sin\theta)$ 和 $J_{n-1}(n\sin\theta)$ 是第一类贝塞尔函数，ψ_n 是一个只与螺旋线的几何形状有关的相位因子。可以看出，模式形成器输出的模式电压的幅度与 θ 有关而与 ϕ 无关，相位与 ψ_n,ϕ 有关而与 θ 无关，而 ψ_n 可由入射波在 $\phi=0$ 时得到的模式电压的相位进行补偿消除，因此经相位补偿后 n 阶模的模式电压相位等于 $n\phi$。因此可以通过各阶模模式电压的幅值比来确定 θ 角；通过各阶模经相位补偿后的模式电压相位来确定 ϕ，这就是比幅比相的理论基础。

3 多臂螺旋天线测向的数值仿真

根据上面介绍的基本理论，本节将以四臂等

角螺旋天线为接收天线，用一定入射角的平面波投射到天线上，采用数值计算方法仿真平面波投射时天线端口的开路电压，再把端口开路电压用（4）式转换为模式电压，采用比幅比相方法判断入射波方向。

3.1 多臂螺旋测向的仿真模型及方法

四臂螺旋天线作为接收天线放在 XOY 平面上，天线中心位于坐标原点，天线的螺旋率为 0.172，天线的臂宽角 $\delta=45^0$，天线的起始极径取为 24mm，天线外半径为 358mm，螺旋率为 0.172。

采用基于矩量法(MoM)的电磁场数值计算软件 FEKO 对上述模型进行数值仿真，由于该软件无法测量天线端口的开路电压，因此仿真中开路电压测量采用与实际天线开路电压测量相似的方法，在四个天线端口与地之间各接一个阻值远大于天线内阻的负载，测量该负载上的电流，该电流与负载阻值的乘积近似为端口开路电压。本文把天线作为辐射天线时测得各臂阻抗不超过 200 欧姆，在作接收天线时负载电阻取为 $10M\Omega$，远大于天线内阻。

采用频率 1.2GHz，幅度 1v/m，投射方向（θ,φ）的线极化平面波投射到天线上，如图 1 所示，仿真天线四端口的开路电压。

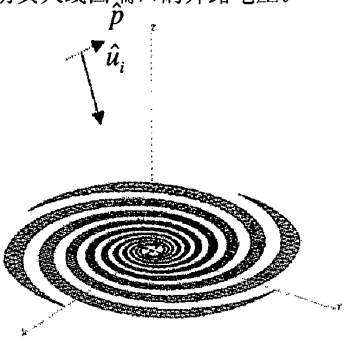

图 1 多臂等角螺旋测向仿真模型

（$\hat{u}_i$ 为平面波投射方向，$\hat{p}$ 为平面波极化方向）

3.2 等角螺旋天线测向的数值仿真结果

入射波以不同的俯仰角和方位角投射时，测量天线的四端口电压，经（4）式转化为模式电压 M1～M4，通过模式电压幅度比估计投射波的俯仰角，通过模式电压相位估计投射波的方位角。

3.2.1 投射波俯仰角的估计

模式电压的幅度比 M2/M1 和 M3/M1 分别见表 1 和表 2。

表 1 不同投射角下模拟得到的 M2/M1

θ	ϕ					
	0	20	40	60	80	均值
10	0.235	0.228	0.232	0.239	0.239	0.235
20	0.492	0.476	0.484	0.498	0.499	0.490
30	0.730	0.693	0.718	0.739	0.739	0.724
40	0.901	0.833	0.891	0.931	0.912	0.894
50	1.001	0.907	0.997	1.072	1.014	0.998
60	1.050	0.947	1.055	1.171	1.069	1.050

表 2 不同投射角下模拟得到的 M3/M1

θ	ϕ				
	0	20	40	60	80
10	0.089	0.161	0.161	0.089	0.040
30	0.678	0.742	0.810	0.749	0.657
50	1.012	1.032	1.170	1.137	0.998

从表 1 可以发现，M2/M1 比值主要与俯仰角相关，随方位角的变化较小，在同一俯仰角下，对不同方位角的 M2/M1 求均值，该均值随俯仰角的变化曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出，俯仰角在 0～50 度之内变化时，M2/M1 与俯仰角基本呈线性关系，通过 M2/M1 的测量结果可较好估计俯仰角；当俯仰角大于 50 度时，M2/M1 随方位角的变化不敏锐，对来波方向估计不太有利。表 2 中同一俯仰角下，M3/M1 的大小随方位角的变化而变，与理论结果间存在较大误差，无法通过 M3/M1 的幅度来正确估计俯仰角。

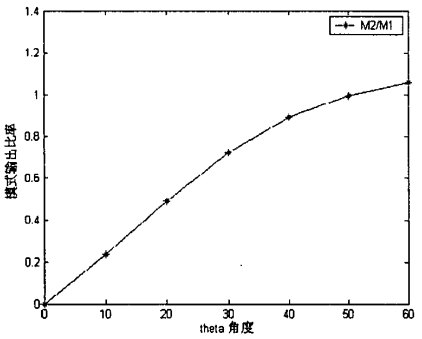

图 2 模式输出幅度比与俯仰角的关系

3.2.2 通过模式电压相位估计方位角

同样采用 1.2GHz 频率，在俯仰角为 20 度条件下，测量不同方位角与各阶模模式电压相位间的关系，结果如图 3 所示，对各模式进行相位补偿后得到的方位角与模式电压相位间的关系如图 4 所示，图 4 同时给出了根据公式（5）解出的方位角与模式电压相位间关系的理论结果。

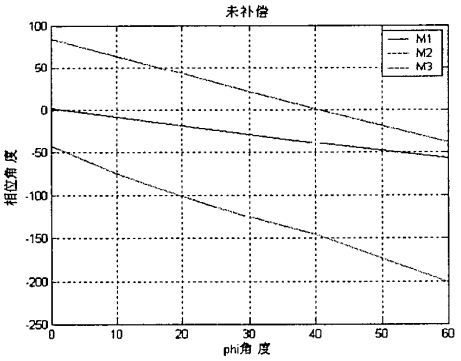

图 3　1.2GHz 四臂天线补偿前相位与方位角的关系

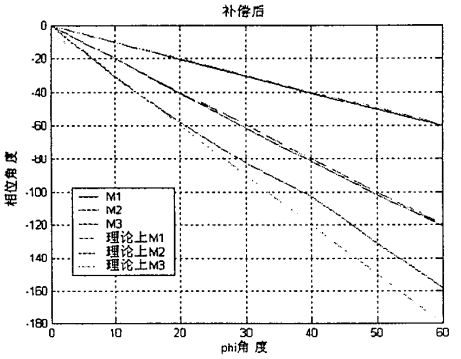

图 4　1.2GHz 经相位补偿后的模式电压相位与方位角关系的仿真结果与解析结果比较

从图 4 可以看出，补偿后的 M1 和 M2 相位随方位角的变化与理论结果基本一致，M3 在 $\varphi < 20^0$ 时与解析结果一致，而当 $\varphi > 20^0$ 时与理论结果存在较大误差。

利用方位角与经相位补偿后的模式相位间的这种线性关系，可以方便的从测量相位得到投射波的方位角，且使用的模式越高，曲线斜率越大，角度估计越精确。不同频率及不同俯仰角对应各模式的相位补偿角不同，图 5 是在 30 度俯仰角时，不同模式相位补偿角随频率的变化曲线。

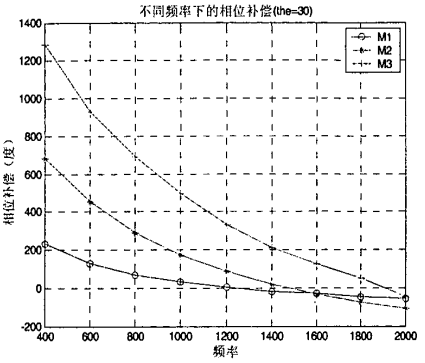

图 5 不同模式相位补偿角随频率的变化曲线

4 结论

本文采用电磁场数值计算的方法对等角螺旋天线的测向特性进行了仿真，仿真结果与解析分析结果的一致性说明了该方法的正确性和可行性。该方法的应用可为检测工作在一定频带一定模式的等角螺旋天线的测向性能提供极大的方便。

采用该数值仿真方法还可以完成：（1）测量天线的有效测向频带和模式，并估计测向精度；（2）给出天线在不同工作频率下的模式幅度比与俯仰角的关系曲线；（3）给出天线在不同频率及俯仰角条件下，各工作模式的相位补偿角及相位补偿后的模式相位与方位角变化曲线。上述(2)(3)步所得到的关系曲线是等角螺旋天线测向所需的重要数据，由于实际天线加工时存在一定的误差，因此上述仿真曲线可能和实际天线的特性还存在一定的差异，必要时仍需通过实测进行校正。

文中 3 阶模的比幅及比相结果与解析结果均存在较大差异，甚至无法实现测向，该现象可能是由于天线半径不够大及天线臂数目较少引起的。加大天线尺寸，增加天线臂的数目应该可以解决该问题，但常常天线尺寸受使用环境的限制而不能过大，天线臂数目的增加也会成倍地增加接收端口的复杂度，因此如何在不改变天线尺寸及结构的条件下，利用模式电压的比幅比相结果结合天线的辐射特性实现高精度测向是我们

进一步研究的方向。

参考文献：

[1] Corzine,R.G, andMosko,J.A. Four-Arm Spiral Antennas [M].Norwood, MA:Artech House,1990;

[2] G.Debalina, D.Arijit,M.C.Taylar etal,Transmission and Reception by Ultra-Wideband (UWB) Antennas, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2006,Vol48(5): 67-99.

[3] 袁正宇，鄢泽洪，魏问元等，双臂微带螺旋天线的矩量，微波学报，1999，vol15(4):306-311;

[4] 周水庚，反辐射导弹技术发展评述.上海航天.1997.1

[5] R.P.Penno and K.M.Pasala, Angle estimation with a Multi-Arm spiral antenna.Proceedings of Aerospace Conference, Mar, 1999：195-207.

[6] Penno,R.P,and Pasala,K.M.Theory of angle estimation using a multiarm spiral antenna[J].IEEE Trans.on aerospace and electronic systems，VOL.37,NO.1,January 2001：123-131.

[7] B.R.S Cheo，V.H.Rumsey，W.J.Welch, A solution to the Frequency-Independent antenna problem. IRE Trans on antenna and propagation， 1961(Nov)：527-534.

[8] V.H.Rumsey, Frequency Independent Antennas, Academic Press, New York, NY, 1966.

席晓莉（1967－），女，陕西人，副教授，1990年获国防科技大学应用物理专业学士，2004 年获西安交通大学电磁场与微波技术专业工学博士。近年主要从事电波传播、天线设计、电磁场数值计算等领域的研究工作。

刘江凡（1985－），男，江西人，西安理工大学在读硕士研究生，主要研究方向为，天线与微波技术。

伦伯透镜天线设计及仿真

李杨　席晓莉

（西安理工大学自动化与信息工程学院 陕西 西安 710048）

摘要：本文在介绍最小最大优化方法的基础上，采用电磁场数值仿真软件对由此方法和传统的各层厚度一致方法设计得到的 6 层伦伯透镜天线进行了性能对比。通过对馈源与伦伯透镜之间的距离的优化，得到了一个增益为 27.4dB 的伦伯透镜天线。

关键词：伦伯透镜；伦伯透镜天线；最小最大优化方法

Simulation and design of Luneburg Lens Antenna

Li yang　Xi Xiao-li

(School of Automation and Information Engineering,(Xi'an University of Techonology　Xi'an, Shaanxi,710048)

Abstract: Based on introducing minmax optimization method, the numerical simulation is used to compare the performance of the six shell luneburg lens antennas which are derived from minmax optimization method and Uniform lens method, respectively. After optimizing the distance of feed and luneburg lens, we get the luneburg lens antenna that the gain is 27.4dB.

Keys words: luneburg lens, luneburg lens antenna, minmax optimization method

1 引言

伦伯透镜(luneburg lens)是伦伯(R K. Luneberg) 于 1944 提出一种介质球，距今已有超过 60 多年的历史。这种介质球由介电常数连续变化的对称球体组成。理想伦伯透镜内部的相对介电常数是沿径向分布的，该透镜能够将入射的平面波汇聚到球体的焦点位置，相反，它也能够把来自焦点处的点源辐射发散成平面波[1]。因此，伦伯透镜天线能够接收不同方向的信号，实现多波束通信。与此同时伦伯透镜能够改变波束的宽度，增加整个天线系统的增益[2]。目前，伦伯透镜天线已经广泛的应用于微波、毫米波、移动通信和射电天文等领域[3,4]。

由于实际制作和加工等方面的原因，伦伯透镜不可能做到相对介电常数沿径向的连续变化，只能在保持系统性能良好的情况下，尽量逼近理

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)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)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)，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