

地面对无线传感网节点天线特性影响的研究

徐 燕 易卫东

(中国科学院研究生院信息科学与工程学院 北京 100049)
(xuyan06@mails.gucas.ac.cn)

The Effects of Ground on the Performance of Antenna in the Wireless Sensor Nodes

Xu Yan and Yi Weidong

(School of Information Science and Engineering, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract When a sensor node is placed above the ground, the performance of its antenna will be affected by the ground due to the antenna image theory. In this paper, we have made simulation and analysis of the antenna radiation directivity diagram of sensor node above the ground based on the electromagnetic theory. Results show that within the certain height, the effects of the ground result in deviation of the maximum radiation intensity direction of antenna, which may make the link quality go down, or even breakage. By a way of placing sensor node in a reasonable height, the unfavorable effects of ground on antenna radiation directivity can be dramatically weakened. At last, we apply the simulation result to agriculture monitoring applications.

Key words wireless sensor network; antenna performance; simulation and analysis; ground

摘要 基于天线理论中镜像原理,地面对影响它附近的无线传感器网络节点天线特性。根据电磁场原理,对地面上节点天线的辐射场方向性图进行了仿真分析。结果表明,当节点天线置于地面上一定高度范围内时,地面对影响导致天线最大辐射方向发生改变,从而导致节点间通信质量下降甚至可能引起通信链路中断,合理设置节点距离地面的高度,可使地面对天线辐射场方向性的不利影响大大降低。最后将仿真结果应用到农田监测环境中。

关键词 无线传感器网络;天线特性;仿真分析;实际地面

中图法分类号 TN925.3; TP391.9

近年来,无线传感器网络技术受到越来越多的关注和应用,其节点设计、通信协议、路由算法、数据管理等都是研究的热点,但是有关无线传感器网络节点天线特性的研究工作相对较少^[1-6],这些研究主要集中在3方面:1)利用方向性天线进行节点定位或者延长网络生存期^[1-2];2)考虑设备材质尺寸的节点天线设计^[3-4];3)温湿度及障碍物对天线性能影响^[5-6]。无线传感器网络技术在实际应用中,其节点往往被置于地面上或距地面一定高度,根据天线理论中的镜像原理^[7-9],地面对节点天线特性造成影

响,因此,有关地面对节点天线特性影响的研究有必要性,但目前有关这方面的研究工作仍然缺乏,本文对这方面进行了理论分析和仿真。基于已有的天线辐射场一般理论^[7-8],考虑到节点距地面高度超过一个波长的情况,推导出了受地面影响的天线辐射场公式。另外,有关地面对天线辐射特性影响的文献主要考虑的是几兆赫兹到几十兆赫兹的通信频率^[10-12],而不是无线传感器节点常用的2.4 GHz通信频率。

本文考虑被置于地面或距地面一定高度的节

收稿日期:2010-09-08

基金项目:国家“八六三”高技术研究发展计划基金项目(2009AA12Z143)

点,根据电磁场原理,推导了节点天线的辐射场场强,并通过仿真得到天线辐射场方向性图。通过对辐射场方向性图的分析发现,地面影响导致天线最大辐射方向发生改变,从而导致节点间通信质量下降甚至不能通信,合理设置节点离地高度可大大减弱地面对节点天线特性的不利影响,并以农田实际环境为例,仿真得到此环境下的最佳节点安置高度。

1 实际地面影响下节点天线辐射场公式的计算

在对实际地面影响下节点天线辐射场求解时,引入镜像原理,其做法是:在理想地面下对称位置处引入一镜像,使得天线和镜像组成的等效系统与天线和理想地面组成的真实系统,在理想地面处满足相同的边界条件,在上半空间产生的场相同;实际地面上的天线可采用镜像原理近似求解,但镜像强度减小,镜像电流等于天线电流乘以平面波反射系数, Γ_v 为入射电场平行于极化面(地面法向与传播方向形成的平面)的平面波反射系数, Γ_h 为入射电场垂直于极化面的平面波反射系数^[7], Γ_v, Γ_h 的具体表达式见式(1)(2),其中 ξ 是地面的平均相对介电常数, σ 是地面的电导率, ξ_0 是自由空间的介电常数, θ 为天线上一点到观察点的连线与垂直方向的夹角。

$$\Gamma_v = \frac{\left(\xi - j \frac{\sigma}{w\xi_0}\right) \cos \theta - \sqrt{\left(\xi - j \frac{\sigma}{w\xi_0}\right) - \sin^2 \theta}}{\left(\xi - j \frac{\sigma}{w\xi_0}\right) \cos \theta + \sqrt{\left(\xi - j \frac{\sigma}{w\xi_0}\right) - \sin^2 \theta}}, \quad (1)$$

$$\Gamma_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\left(\xi - j \frac{\sigma}{w\xi_0}\right) - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\left(\xi - j \frac{\sigma}{w\xi_0}\right) - \sin^2 \theta}}. \quad (2)$$

基于镜像原理,建立如图1所示的等效系统:

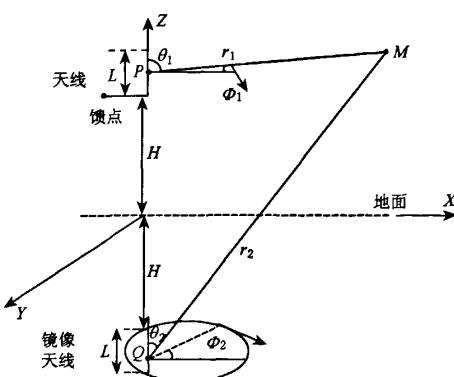


图 1 基于镜像原理建立的等效系统

图1中,假设天线长度为L,天线离地高度为H,天线上任意一点P到远场中点M的距离为 r_1 ,镜像天线上任意一点Q到远场中点M的距离为 r_2 ; r_1 与Z轴的夹角为 θ_1 , r_2 与z轴的夹角为 θ_2 , Φ_1, Φ_2 分别为P,Q到点M的连线在XY平面上的投影与X轴的夹角。文献[7-8]在对天线离地面高度H不到一个波长的天线辐射场计算分析时,假设 $r_1=r_2, \theta_1=\theta_2$,但是不能忽略P,Q到点M的相位差 ζ, ζ 的表达式见式(3)。通常,无线传感器网络使用2.4 GHz通信频率,其对应波长为0.125 m,若干米的节点离地高度相当于波长的几倍甚至几十倍,在这种情况下,以 θ_1 为自变量,以 $\Delta\theta, \Delta r$ 为函数, $\Delta\theta, \Delta r$ 的表达式见式(4)(5),观察不同离地高度时 $\Delta\theta$ 和 Δr 的变化,如图2所示。

$$\begin{aligned} \zeta &= kr_1 - k(L+2H) \cos \theta_1 = \\ &kr_2 - k(L+2H) \cos \theta_2, \quad k=2\pi/\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1, \quad (4)$$

$$\Delta r = r_2 - r_1. \quad (5)$$

从图2(a)中可以看出,| $\Delta\theta$ |随着 θ_1 的增大而增大,当 $\theta_1=90^\circ$ 时,| $\Delta\theta$ |达到最大值| $\Delta\theta|_{\max}$;离地高度H越高,| $\Delta\theta|_{\max}$ 越大,式(3)中 $k(L+2H)\cos\theta_1$ 和 $k(L+2H)\cos\theta_2$ 相差越大;当 $\theta_1=90^\circ$,H从 2λ 变化至 24λ 时,经计算, $k(L+2H)\cos\theta_1$ 偏离 $k(L+2H)\cos\theta_2$ $2^\circ \sim 105^\circ$,这时由| $\Delta\theta|_{\max}$ 造成的相位差别不能忽略,也就是不能够再假设 $\theta_1=\theta_2$ 。从图2(b)中可以看出, Δr 随着 θ_1 的增大而减小,当 $\theta_1=90^\circ$ 时, Δr 达到最小值(Δr)_{min},且无论离地高度H为多少,(Δr)_{min}均为0。由于各节点离地高度相同,所以 θ_1 接近 90° ,这种情况下可忽略 Δr ,即认为 $r_1=r_2$,不可忽略 $\Delta\theta$ 。为了能够更精确地描述天线辐射场,本文没有忽略 Δr 。

基于上述分析,修改文献[7-8]对地面上天线辐射场分析的假设,认为天线上每一点到点M的距离都同为 r_1 ,且到点M的连线互相平行;但是不能忽略天线上任意两点到点M的相位差。镜像天线上每一点到点M的距离都同为 r_2 ,且到点M的连线互相平行,但是不能忽略镜像天线上任意两点到点M的相位差。天线上任意一点P和镜像天线上任意一点Q到点M的距离不同,到点M的连线也不平行,即 $r_1 \neq r_2, \theta_1 \neq \theta_2$ 。本文所用天线为2.4 GHz吸盘天线,如图3(a)所示。天线由3部分构成:杆天线 L_1 、螺旋天线 L 、杆天线 L_2 ,天线模型及尺寸如图3(b)所示。

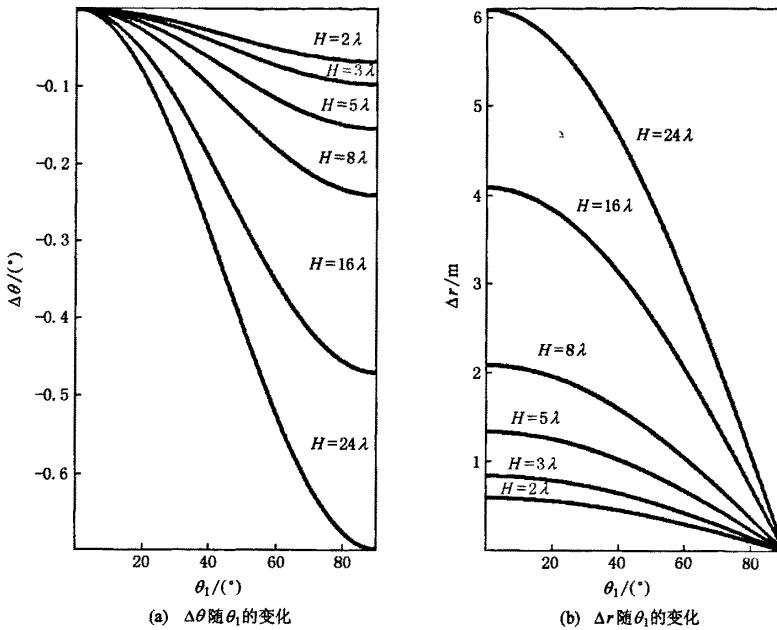


图 2 不同离地高度下 $\Delta\theta$ 与 Δr 对应 θ_1 的变化曲线(取天线到点 M 的水平距离为 500 m, 天线的长度为 0.09 m, 计算做图时 P, Q 分别取作天线中心和镜像天线中心)

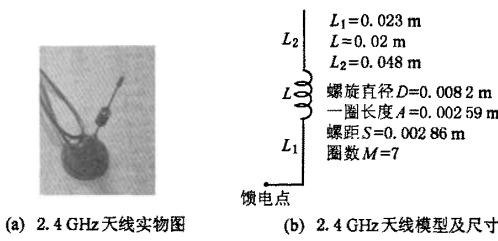


图 3 本文采用的 2.4 GHz 天线实物图及其模型尺寸

基于本文给出的前提条件及天线尺寸, 根据电磁场原理, 得到天线辐射场公式:

$$E_{\text{实际}} = E_{L_1} + E_L + E_{L_2}; \quad (6)$$

$$E_{\text{镜像}} = E'_{L_1} + E'_L + E'_{L_2}; \quad (7)$$

$$E_{\text{总}} = E_{\text{实际}} + E_{\text{镜像}}; \quad (8)$$

$$E_{L_1} = \hat{\theta} j \omega \mu \frac{e^{-jkz_1}}{4\pi r_1} \sin \theta_1 \int_{H+L_2+L}^{H+L_1+L_2+L} \text{Im} \sin [k(z-H+NA-L)] e^{jk(z-z_{L_1}) \cos \theta_1} dz; \quad (9)$$

$$E_{L_2} = \hat{\theta} j \omega \mu \frac{e^{-jkz_1}}{4\pi r_1} \sin \theta_1 \int_H^{H+L_2} \text{Im} \sin [k(z-H)] e^{jk(z-z_{L_2}) \cos \theta_1} dz; \quad (10)$$

$$E_L = \hat{\phi} j \eta k s \frac{e^{-jkz_1}}{4\pi r_1} \sum_{\Delta=1}^7 \text{Im} \sin [k(L_2+L-(\Delta-1)A)] e^{jk(\Delta-1)S \cos \theta_1} + \hat{\theta} j \eta k s \frac{e^{-jkz_1}}{4\pi r_1} \sin \theta_1 \sum_{\Delta=1}^7 \text{Im} \sin [k(L_2+L-(\Delta-1)A)] e^{-jk(\Delta-1)S \cos \theta_1}; \quad (11)$$

$$L - (\Delta - 1)A] \} e^{jk(\Delta-1)S \cos \theta_1}; \quad (11)$$

$$E'_{L_1} = \hat{\theta} j \omega \mu \frac{e^{-jkz_2}}{4\pi r_2} \sin \theta_2 \int_{H+L_2+L}^{H+L_1+L_2+L} \Gamma_v \text{Im} \sin [k(z-H+NA-L)] e^{-jk(z-z_{L_1}) \cos \theta_2} dz; \quad (12)$$

$$E'_{L_2} = \hat{\theta} j \omega \mu \frac{e^{-jkz_2}}{4\pi r_2} \sin \theta_2 \int_H^{H+L_2} \Gamma_v \text{Im} \sin [k(z-H)] e^{-jk(z-z_{L_2}) \cos \theta_2} dz; \quad (13)$$

$$E'_L = \hat{\phi} j \eta k s \frac{e^{-jkz_2}}{4\pi r_2} \sin \theta_2 \sum_{\Delta=1}^7 \Gamma_v \text{Im} \sin [k(L_2+L-(\Delta-1)A)] e^{-jk(\Delta-1)S \cos \theta_2} + \hat{\phi} j \eta k s \frac{e^{-jkz_2}}{4\pi r_2} \sin \theta_2 \sum_{\Delta=1}^7 \Gamma_h \text{Im} \sin [k(L_2+L-(\Delta-1)A)] e^{-jk(\Delta-1)S \cos \theta_2}; \quad (14)$$

其中 $E_{\text{实际}}$ 为实际天线产生的辐射场, $E_{\text{镜像}}$ 为镜像天线产生的辐射场, $E_{\text{总}}$ 为总的辐射场, E_{L_1}, E_L, E_{L_2} 为实际天线的各部分产生的辐射场, E'_{L_1}, E'_L, E'_{L_2} 为镜像天线的各部分产生的辐射场, 式(9)~(14)中的 $\hat{\theta}$, $\hat{\phi}$ 分别代表辐射场方向沿 θ 方向、沿 Φ 方向; $\sin \theta_1$, $\sin \theta_2$ 为单元因子, $\sin \theta_1$ 为位于点 P 的基本电振子的方向图函数, $\sin \theta_2$ 为位于点 M 的基本电振子的方向图函数; 各式中的积分或求和部分为空间因子, 空间因子仅由电流分布决定; 式(11)~(14)分别为天

线螺旋部分和镜像天线螺旋部分的辐射场公式,是根据法向模螺旋天线的基本公式进行推导的。 ω 为角频率, μ 为真空中的磁导率, η 为天线的固有阻抗, k 为相位常数。实际应用中,为防雨雪,天线倒立放置,因此,在推导相关公式时,都是假设天线倒立的情况。

2 实际地面影响下的天线辐射场方向性图及分析

在实际应用时,取大地平均相对介电常数 ξ 为

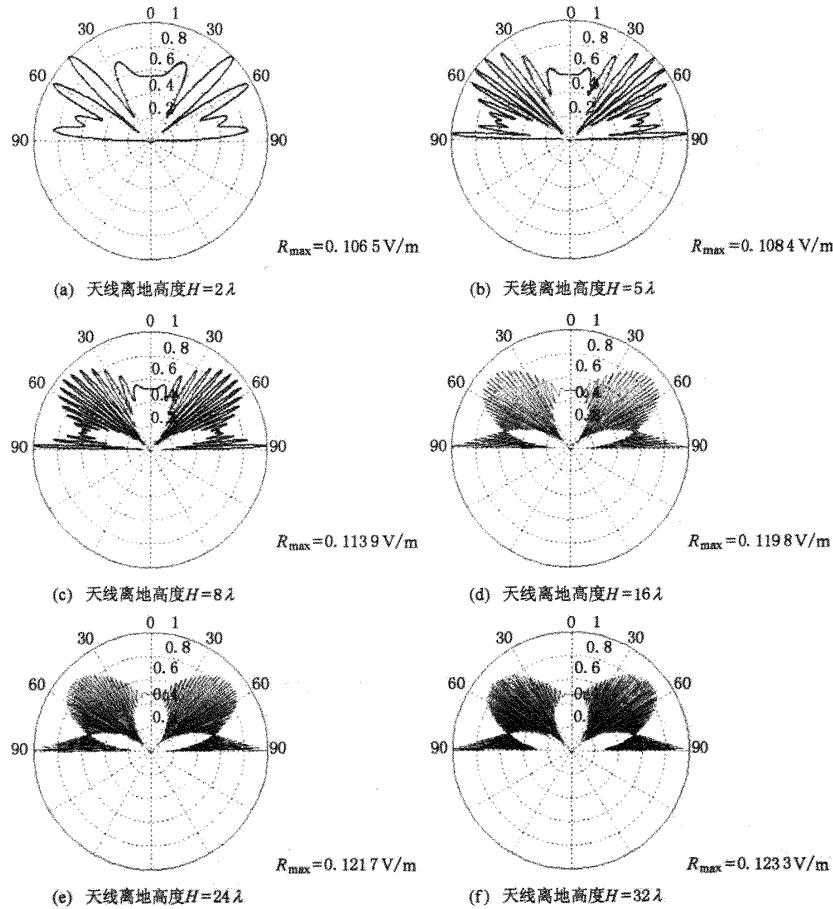
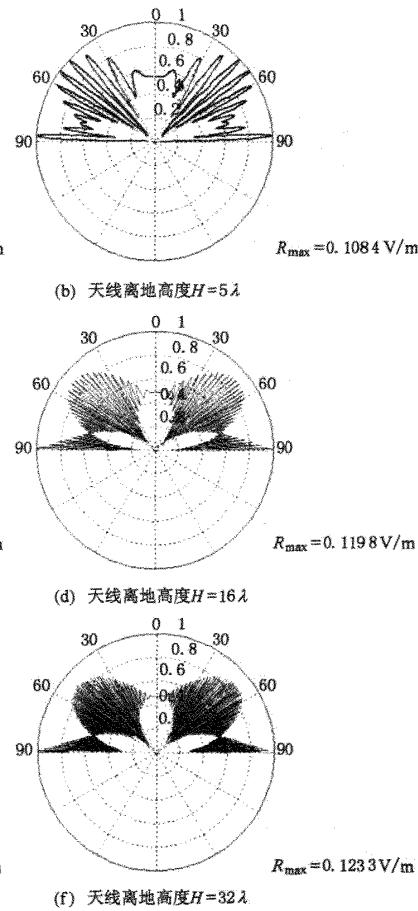


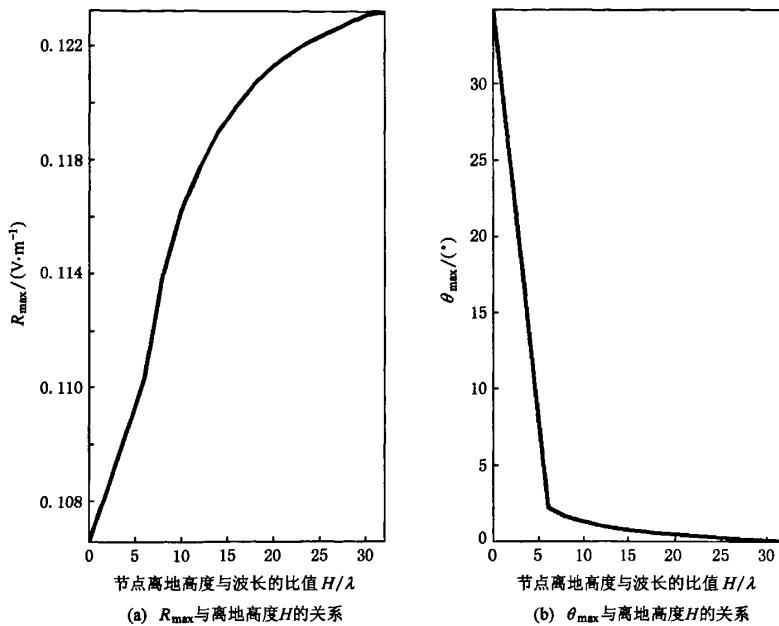
图4 不同节点离地高度下天线的辐射场归一化方向性图(90° 方向为水平方向, H 为天线距离地面的高度, λ 为天线波长, $\lambda=0.125 \text{ m}$, R_{max} 为电流幅值为 1 A 时的最大振幅值)

图4给出了节点离地高度 H 从 2λ 到 32λ 不同高度时天线辐射场归一化方向性图。从图4(a)可以看出,当 $H=2\lambda$ 时,最大辐射方向与水平方向的偏角约为 45° ,最大辐射强度 R_{max} 为 0.1065 V/m ;随着离地高度 H 的增加,最大辐射方向与水平方向的偏角越来越小,最大辐射强度 R_{max} 越来越大;当离地高

$15^{[7]}$,大地电导率 σ 为 $5 \times 10^{-8} (\text{S}/\text{m})^{[8]}$,将 ξ, σ 代入式(1)(2),得到入射电场平行于极化面的反射系数 Γ_v 、入射电场垂直于极化面的反射系数 Γ_h 。将 Γ_v 、 Γ_h 及图3(b)中给出的天线尺寸参数代入 $E_{L_1}, E_L, E_{L_2}, E'_{L_1}, E'_L, E'_{L_2}$ 的表达式,并选取节点离地高度 H 为多个不同值,用 MATLAB 仿真,得到与图3(a)中 2.4 GHz 吸盘天线对应的辐射场方向性图。本文提到的辐射场方向性图均为振幅方向性图。6个不同离地高度下天线的辐射场归一化方向性图如图4所示:



度 $H=24\lambda$ 和 32λ 时,最大辐射方向几乎与水平方向重合,最大辐射强度分别达到 0.1217 V/m 和 0.1233 V/m 。辐射场方向性图中非常重要的两个量分别为最大辐射强度的大小 R_{max} 及最大辐射强度的方向偏离水平方向的角度 θ_{max} 。对 16 个不同离地高度下的 R_{max} 及 θ_{max} 进行计算,结果如图 5 所示:

图 5 R_{\max}, θ_{\max} 与离地高度 H 的关系

从图 5(a)中看到,天线最大辐射强度 R_{\max} 随着离地高度 H 的增加而增大,但增大的幅度越来越弱;从图 5(b)中看到,天线最大辐射强度的方向偏离水平方向的角度 θ_{\max} 当离地高度 $H \approx 6\lambda$ 时发生陡降,此后随着 H 的增加缓慢减小,当离地高度 H 约大于等于 27λ 时,天线的最大辐射方向已和水平方向重合并不再随着 H 而变化。无线传感器网络节点天线为收发天线,若网内各节点距离地面高度相同,为了能够使各节点都处于其他节点的最大辐射方向范围内,要求天线的最大辐射方向 θ_{\max} 要尽可能在水平方向,最大辐射强度 R_{\max} 越大越好。由图 5(b)可知,当 $H \approx 27\lambda$ 时,天线的最大辐射方向同水平方向重合,这时天线最大辐射强度只比 H 为 32λ 约小 0.0005 V/m,又考虑到距离地面太高增加了节点安装和维护难度,认为距离地面高度 $H = 27\lambda$ (对应 3.375 m)为节点最佳安置位置。

3 在农田环境中的模拟应用

以麦田为例,冬季土质又硬又干,属于干土,夏季土质相对松软湿润,根据文献[8],干土的平均相对介电常数 ξ 为 4,平均电导率 σ 为 10^{-3} ,湿土的平均相对介电常数 ξ 为 10,平均电导率 σ 为 10^{-2} ,从冬季到夏季,地面相对介电常数 ξ 从 4 变化到 10,电导率 σ 从 10^{-3} 变化到 10^{-2} ,取此范围内的多个点代入式(1)(2)计算 Γ_v, Γ_h ,在计算过程中发现,不同电

导率的影响可忽略;将结果代入式(6)~(14)得到不同平均相对介电常数 ξ 时的辐射场,考虑到小麦平均高度为 0.5 m,节点距离地面高度不能低于此高度。进行仿真分析时离地高度 H 从 4λ 起逐渐增大,得到不同相对介电常数 ξ 下的节点最佳离地高度曲线,如图 6 所示。

从图 6 可知,当地面相对介电常数 ξ 取 4~10 时,最佳离地高度维持在 2.5 m 不变,但在此高度时其最大辐射强度的大小随着相对介电常数的增加而缓慢降低。这一结果表明,同样离地高度 H 及相同发射功率的情况下,夏季节点天线的收发能力要比冬季差。

4 结束语

考虑到地面由于镜像作用会对无线传感器节点天线特性造成影响,本文对此进行研究。通过一系列假设及理论推导,得到节点天线辐射场公式;基于公式进行仿真,得到辐射场方向性图。对节点离地不同高度时其天线辐射场方向性图进行分析,其结果表明:由于地面影响,天线最大辐射方向偏离水平方向;节点距离地面越高,最大辐射方向偏离水平方向的偏角越小;最大辐射强度随着节点离地高度的增加而增大,但增大的趋势越来越弱;当天线距离地面达到某一高度时,最大辐射方向和水平方向重合,这时最大辐射强度随离地高度的增加变化非常小,认

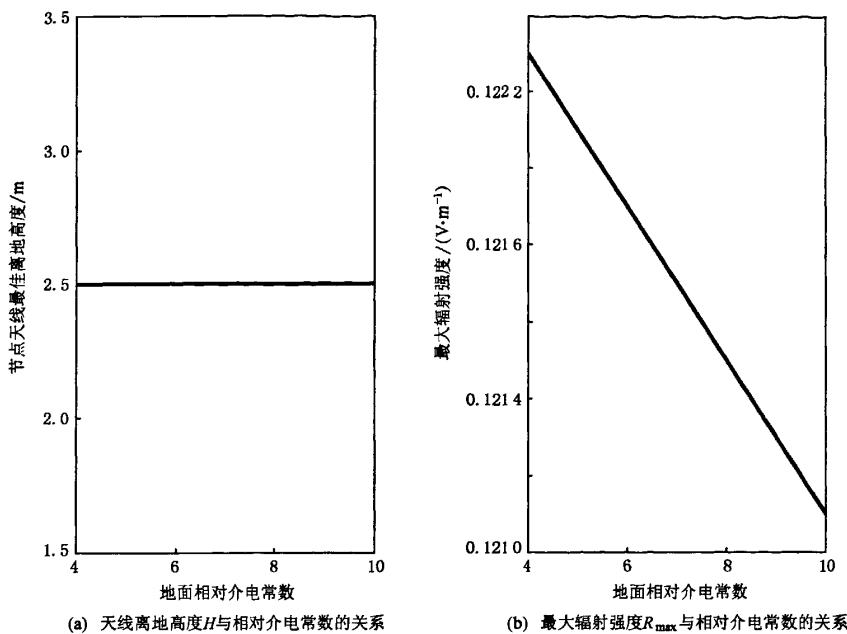


图 6 不同介电常数下天线最佳离地高度及最佳离地高度处的最大辐射强度值

为这时最大辐射强度已达到最大值,由此确定节点天线距离地面的最佳高度。

本文在研究地面镜像作用对无线传感器节点天线特性造成影响时,假设节点间距离一定,没有考虑距离变化的影响。下一步的工作将结合节点间距离变化对天线辐射特性进行更深入的分析,使仿真更接近真实,同时设计室外场地试验床实验,对仿真结果进行验证。

参 考 文 献

- [1] Dileep Kumar, Dr. Shirshu Varma. An efficient localization based on directional antenna for wireless sensor networks (WSN's). *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2009, 1(5): 1793-8163
- [2] Jaekyu Cho, Jeongkeun Lee, Taekyoung Kwon. Directional antenna at sink (DAaS) to prolong network lifetime in wireless sensor networks //Proc of the 12th European Wireless Conf. 2006. [2010-04-17]. <http://mmlab.snu.ac.kr/publications/docs/DAaS.pdf>
- [3] David V Thiel, Amir Galehdar. Recent innovations in antenna design for wireless sensor networks //Int Conf on Electromagnetics in Advanced Applications. 2009: 63-65
- [4] Constantine G Kakoyiannis, Philip Constantinou. Co-design of antenna element and ground plane for printed monopoles embedded in wireless sensors //Proc of the 2nd Int Conf on Sensor Technologies and Applications. 2008: 413-418
- [5] Dennis Laffey, John Buckley, Brendan O'Flynn. The development of environmentally tested antennas for wireless sensor networks //Proc of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors. 2007: 73-77
- [6] Wang Kuangching, Venkatesh Gayatri, Carter Shari. Building wireless mesh networks in forests: Antenna direction, transmit power, and vegetation effects on network performance //Proc of the 3rd ACM Int Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization. New York: ACM, 2008: 97-98
- [7] 康行健. 天线原理与设计. 北京: 北京理工大学出版社, 1993
- [8] 闻应红. 天线与电波传播理论. 北京: 清华大学出版社, 2005
- [9] Kamal Sarabandi, Liao Dahan. Near-earth performance analysis and optimization of low-profile antennas //IEEE Radio and Wireless Symposium. Piscataway, NJ: IEE, 2007: 245-248
- [10] 黄麟舒, 蒋宇中, 王祥书. 损耗地面上线天线的一种近似计算方法. 海军工程大学学报, 2005, 17(2): 79-83
- [11] Bender, Inc. Ground/Radial Systems Tech Notes. Antioch, USA: Bencher, Inc, 2010
- [12] SteppIR Antennas. Radial Systems for Elevated and Ground Mounted Vertical Antennas. 2010

徐燕 女,1983 年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络及其应用等。

易卫东 男,1959 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络及其应用等(weidong@gucas.ac.cn)。

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，一直致力于专注于微波、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>