

无线家庭网络印制倒F型天线的分析与设计

刘彤¹ 樊宏² 沈连丰¹

(¹ 东南大学移动通信国家重点实验室,南京 210096)

(² 解放军 69046 部队,乌鲁木齐 830002)

摘要:从电波传播机理出发,分析室内电波的退极化现象,研究WHAN对天线的极化、辐射及阻抗匹配特性的特殊要求。从传输线理论入手,推导出印制IFA输入阻抗的解析式,并据此分析其输入阻抗随其水平分枝长度变化的规律。根据印制IFA各分枝的电流分布特性,得出其空间辐射电场的解析式,从而证明其辐射既具有等向特性又具有交叉极化特性。仿真印制IFA各尺寸参数变化对其输入阻抗和谐振频率的影响效果,给出其规律及设计方法,并设计出一例适用于蓝牙WHAN的小尺寸印制IFA。测试结果表明,在2.4 GHz频率附近,电压驻波比为2.0时的带宽约为490 MHz,可完全覆盖蓝牙的工作频段2.400~2.484 GHz,而且所测方向图也进一步印证该天线确实具有等向辐射特性和交叉极化特性。此外,该天线可与蓝牙模块合为一体,其各种蓝牙产品均已商用,并获江苏省科技进步一等奖。

关键词:无线家庭网络;印制倒F型天线;交叉极化;等向辐射;蓝牙

中图分类号:TN82 文献标识码:A 文章编号:1001-0505(2006)02-0183-06

Analysis and design of printed IFA for WHAN

Liu Tong¹ Fan Hong² Shen Lianfeng¹

(¹National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(²Unit 69046 of Peoples Liberation Army, Wulumuqi 830002, China)

Abstract: Starting with radio wave propagation mechanism, the indoor depolarization phenomenon is analyzed, and the special antenna requirements of WHAN (wireless home area network) for polarization, radiation and impedance match are researched. Proceeding with the transmission line theory, the analytic formula of the input impedance for the printed IFA (inverted F antenna) is educed, and the regularity of its impedance variation with its horizontal branch length is studied. Based on the current distribution characteristic of each branch of the printed IFA, the analytic formula of the radiation electric field is derived, which proves that the printed IFA has both isotropic radiation and cross polarization characteristics. The impacts of all the dimension parameters on both input impedance and resonant frequency of the printed IFA are simulated, and the impact regularity along with the antenna design method is given as well, based on which a small size printed IFA for Bluetooth WHAN is designed. The experimental results show that around 2.4 GHz when VSWR (voltage standing wave ratio) is below 2.0 the band width is about 490 MHz, which is enough for the 2.400~2.484 GHz band of Bluetooth, and the measured radiation patterns also testify further that the antenna has both isotropic radiation and cross polarization characteristics. Furthermore, the antenna can be integrated with Bluetooth module, and varieties of Bluetooth products with the antennas are already in commercial usage, which has won Science & Technology Advancement Prize of Jiangsu Province.

Key words: WHAN; printed IFA; cross polarization; isotropic radiation; Bluetooth

在众多家庭网络方案中,无线方案是最为合适的选择^[1],但无线家庭网络(WHAN)不仅要求天线具有成本低廉、尺寸小巧及易于匹配等特点,更要求天线适于各类家电间通信的室内应用环境。

然而,室内环境中电磁波的传播会受诸多因素的影响,房屋的结构、建筑材料、室内装饰物以及人体的走动、门窗的开关等都会影响到室内无线电波的传播方向、极化方式等传播特性,这将直接成为主导天线设计的重要因素。在室内环境下,接收机所接收到的信号由经多个不同路径的入射信号所共同组成,除直射信号外,还包括反射、衍射和散射等信号。这些电波信号在传播时所遇到各种物体的材料不同,其中有导体、绝缘体,也有半导体,因此造成电波信号经其反射、散射或折射后的特性也各不相同。本文将对室内电波传播特性进行研究,在此基础上归纳出室内环境对WHAN天线设计的特殊要求,并对适用于WHAN室内通信环境的印制倒F型天线的输入阻抗、极化特性、方向特性等各项性能进行分析和仿真,然后给出该天线的最终设计、研制及测试结果。

1 室内无线电波的退极化现象

以均匀平面波入射到理想介质表面为例,假设入射波磁场分量 H_i 与所入射的物体表面平行(见图1),则根据理想介质表面磁场切向分量连续的边界条件可知^[2]

$$H_i + H_r = H_n \quad (1)$$

即入射波磁场 H_i 、反射波磁场 H_r 及折射波磁场 H_n 三个分量的方向互相平行,而由于电场 E 、磁场 H 需满足^[2]

$$E \times H = e \cdot (E \cdot H) \quad (2)$$

即电场分量 E 、磁场分量 H 及其传播方向 e 成右手螺旋关系,三者相互两两垂直,且电场 E 又乘磁场 H 的方向即为电波传播方向 e ,因此由图1可知,

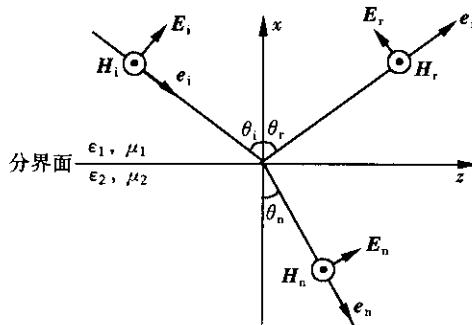


图1 均匀平面波斜入射到理想介质表面示意图
(电场分量与入射面平行的情况)

E_i 、 E_r 及 E_n 的方向均不相同。可见室内障碍物可以改变电波的电场极化方式(退极化),这会导致WHAN系统中的发射信号与接收信号的电场极化方式互相垂直(交叉极化),从而影响信号的正常接收。

文献[3-4]采用试验手段对交叉极化进行测量,结果表明,随着室内障碍物数量的增加,交叉极化分量也随之增加,退极化现象愈加严重,当室内物品摆放杂乱无章时尤为明显。

2 室内环境对WHAN天线的特殊要求

1)交叉极化特性 为使WHAN接收机获得最大接收电平,接收机天线的极化方向需与发射机天线的极化方向一致(极化匹配),但由上述分析可知室内电波传播的退极化现象严重,因此要求天线具有交叉极化特性。即在天线辐射出来的电波中,既要包括电场的水平极化分量,又要包括电场的垂直极化分量,以使无论退极化现象多么严重,收、发天线总能保证至少有一个极化方向是匹配的。

2)等向辐射特性 信息家电的任意摆放常常会造成收、发天线的方向图取向不一致,例如发天线的最大辐射方向为水平方向,而收天线的最佳接收方向为垂直方向,两者相互垂直从而导致接收效果变差。此外,跃层住宅的出现也会带来楼上与楼下的信息家电在垂直方向上通信的问题,因此天线的等方向性辐射特性最适合WHAN的室内应用环境,能保证信息家电以任意的相对位置摆放,乃至相对运动。

3)匹配方便、结构紧凑 由WHAN系统的TDD电路结构所决定,与天线直接相连的元件是滤波器^[5],因此天线的输入阻抗必须能够在无需额外元器件就非常容易改变,以便进行阻抗匹配,从而既能保证滤波器的滤波性能,又能保证天线输入电压驻波比小于2.0匹配的要求,以保证天线的辐射性能。此外,在WHAN系统中,天线的结构一定要非常紧凑,并具有小巧的尺寸、轻便的重量,才能很方便地嵌入并隐藏在信息家电当中,与其融为一体。

3 印制倒F型天线的分析

能满足上述室内环境对天线3种特殊要求的天线中最简洁的就是倒F型天线,将其直接印刷在电路板上,则称为印制倒F型天线,如图2(a)所示。

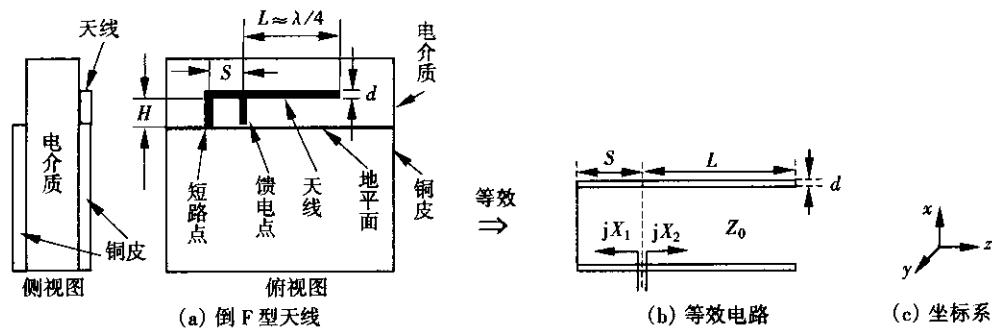


图 2 印制倒 F型天线的等效电路

印制倒 F型天线的等效电路如图 2(b)所示 ,由长为 L 的终端开路传输线与长为 S 的终端短路传输线并联而成 ,当传输线导体线宽 $d \ll H$ 时 ,传输线的特性阻抗 Z_0 可以表示为^[6]

$$Z_0 = \frac{\xi_0}{\pi} \ln \left(\frac{H}{d} + \sqrt{\frac{H^2}{d^2} - 1} \right) \approx 120 \ln \left(\frac{2H}{d} \right) \quad (3)$$

式中 $\xi_0 = 120\pi$ 为空气中波阻抗 Ω .

3.1 电路特性

由长线理论^[7]可知终端短路和终端开路传输线的输入电抗分别为

$$X_1 = Z_0 \tan kS \quad (4)$$

$$X_2 = -Z_0 \cot kL \quad (5)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数 ,设印制倒 F型天线的输入阻抗为

$$Z_{\text{IFA}} = R_{\text{IFA}} + jX_{\text{IFA}} \quad (6)$$

其中 ,输入电抗 X_{IFA} 可以表示为 X_1 与 X_2 的并联 ,即

$$X_{\text{IFA}} = X_1 // X_2 \approx 120 \ln \left(\frac{2H}{d} \right) \frac{\sin kS \cos kL}{\cos^2 k(S+L)} \quad (7)$$

当忽略损耗时 ,天线的输入电阻即等于其辐射电阻 ,由文献[8]给出的倒 F型天线的辐射电阻可得印制倒 F型天线输入电阻为

$$R_{\text{IFA}} = 30(kH)^2 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin^2 kS + \cos^2 kL - \cos k(S+L) \cos kL \frac{\sin kS}{kS}}{\cos^2 k(S+L)} \right\} \quad (8)$$

当天线水平部分的长度 $L = \lambda/4$ 时 ,由式(7)可知 ,天线的输入电抗为 0 ,天线处于谐振状态 ,即

$$\begin{aligned} L &= \frac{\lambda}{4}, \quad kL = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2} \\ \cos kL &= 0, \quad X_{\text{IFA}} = X_0 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

代入式(8)可得

$$\begin{aligned} R_{\text{IFA}} &= R_0 = 30(kH)^2 \cdot \\ &\left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin^2 kS}{\cos^2(kS + \pi/2)} \right\} = 30(kH)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

此时天线的输入电阻 R_{IFA} 为纯电阻 ,与间距 S 无关 ,只与天线高度 H 有关 ,并随天线高度 H 的增加而增加.

当天线水平部分的长度略大于 $\lambda/4$ 即 $L = (\lambda/4 + \Delta)$ 时 ,有

$$R_{\text{IFA}} \approx R_0 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin^2 kS - \sin k\Delta \sin^2 kS / kS}{\sin^2 kS + 2 \sin kS \cos kS \sin k\Delta} \right\} \quad (11)$$

$$X_{\text{IFA}} \approx +120 \ln \left(\frac{2H}{d} \right) \frac{\sin kS \sin k\Delta}{\sin k(S + \Delta)} \quad (12)$$

而间距 S 的取值通常小于 L ,即小于 $\lambda/4$,有

$$\sin kS > 0, \quad \cos kS > 0 \quad (13)$$

故此时有

$$R_{\text{IFA}} < R_0, \quad X_{\text{IFA}} > 0 \quad (14)$$

即当天线水平部分的长度 L 增加时 ,天线的输入电阻 R_{IFA} 将减小 ,而天线的输入电抗 X_{IFA} 则大于 0 ,使天线呈现电感性质.

当天线水平部分的长度略小于 $\lambda/4$ 即 $L = (\lambda/4 - \Delta)$ 时 ,有

$$R_{\text{IFA}} \approx R_0 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin^2 kS + \sin k\Delta \sin^2 kS / kS}{\sin^2 kS - 2 \sin kS \cos kS \sin k\Delta} \right\} \quad (15)$$

$$X_{\text{IFA}} \approx -120 \ln \left(\frac{2H}{d} \right) \frac{\sin kS \sin k\Delta}{\sin k(S - \Delta)} \quad (16)$$

由式(13)有

$$R_{\text{IFA}} > R_0, \quad X_{\text{IFA}} < 0 \quad (17)$$

即当天线水平部分的长度 L 减小时 ,天线的输入电阻 R_{IFA} 将增加 ,而天线的输入电抗 X_{IFA} 则小于 0 ,使天线呈现电容性质.

总之 ,作为天线的谐振部分 ,天线水平部分长度 L 对天线输入阻抗的影响最为直接 ,当其增加时 ,天线的输入电阻减小 ,天线呈感性 ,反之亦然. 通过调整 L ,可使天线的输入阻抗呈纯阻性 ,然后再调节天线高度 H 以使天线的输入电阻接近 50 Ω ,即不需任何额外的电路即可完成阻抗匹配.

3.2 辐射特性

倒 F 型天线不仅具有交叉极化特性,而且还具有等向辐射特性^[9]。当天线谐振即 $L = \lambda/4$ 时,电流主要分布在天线的水平部分^[10](图 2 中 S 和 L 部分)和对地短路部分(图 2 中 H 部分),而馈电部分则基本无电流分布。当取如图 2(c) 所示的坐标系时,由水平部分电流所产生的相对电场强度为

$$E_{S+L} = e_\theta \cos\varphi \left[\cos\theta + j \exp\left(j \frac{\pi}{2} \cos\theta\right) \right] \quad (18)$$

由对地短路部分电流所产生的相对电场强度为

$$E_H = -e_\theta \cos\theta \cos\varphi + e_\varphi \sin\varphi \quad (19)$$

故总的相对电场强度为

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= E_{S+L} + E_H = e_\theta \cos\varphi \cdot \\ &\left[-\sin\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right) + j \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right) \right] + e_\varphi \sin\varphi \end{aligned} \quad (20)$$

因此天线辐射的功率流密度为

$$p = \frac{E_{\text{total}} E_{\text{total}}^*}{2\xi_0} = \frac{1}{2\xi_0} \left\{ \cos^2\varphi \left[\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right) + \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right) \right] + \sin^2\varphi \right\} = \frac{1}{240\pi} \quad (21)$$

可见功率流密度与 θ 和 φ 都无关,因此天线在各个方向上辐射的功率密度都相同,其功率辐射具有等向辐射特性,满足 WHAN 对天线方向性的要求。由式(20)可知电场极化方向既包括 E_θ 分量,又包括 E_φ 分量,因此该天线在周围空间辐射的电场方式具有交叉极化的特点,适合 WHAN 室内电波传播特性的要求。

4 印制倒 F 型天线的设计

由于天线印制到电路板上,印制天线位于空气与介质板之间,且介质板背面无金属,因此受板材影响,天线的谐振长度 L 既不能用真空中波长 λ_0 计算,也不能按微带线计算,而应由经验公式得出波长的修正值^[11]:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\frac{1+\varepsilon_r}{2}}} \quad (22)$$

与此相对应,天线的 3 个参数 L , S 和 H 都会由于受到电路板材介质的影响而相应地缩短。

4.1 尺寸参数对输入阻抗及谐振频率的影响

通过前面的分析可知,当 L 增加时,天线的输入电阻会下降,且总体输入阻抗呈感性,反之亦然。而当 S 和 H 变化时,公式较为复杂,难以分析出较为直观的规律,因此采用仿真方法,分别考虑 S , H ,

L 对天线参数的影响,即在保持其他 2 个尺寸变量不变的条件下,仿真出天线的参数随其中某一个尺寸变化的情况。仿真结果表明,当 H 增加时,天线的输入电阻也会有所增加,而总体输入阻抗愈加呈现电感性质,反之亦然。其中电抗的变化是由于天线的水平部分与地间的距离增加(减小)后,所产生的分布电容减小(增加)所造成的。当 S 增加时,天线的输入电阻有所增加,而总体输入阻抗呈现容性,反之亦然。其中输入电阻的变化是由电流分布不同而造成的,假设馈电点处输入电压幅度不变,则对地短路点处的电流幅度最大,随着向馈电点的逐渐靠近,电流幅度也逐渐减小。当 S 增加时,馈电点处的输入电流幅度变小,从而使输入电阻变大,反之亦然。

上述结果与文献[12]基本吻合(见表 1),并证明文献[13]中关于参数 S 变化对输入电阻影响的结论有误。

可见,天线的 3 个尺寸参数既影响天线的输入电阻,又影响天线的输入电抗,这势必影响到天线的谐振频率。天线的谐振频率 f 随着 H 和 L 的增加而降低,但却随着 S 的增加而升高,反之亦然。此变化规律与文献[13-14]是一致的。

表 1 尺寸参数对天线输入阻抗及谐振频率的影响

变化趋势	输入电阻	输入电抗	谐振频率
L 增加 ↑	减小 ↓	感性	降低 ↓
	增加 ↑	容性	升高 ↑
H 增加 ↑	增加 ↑	感性	降低 ↓
	减小 ↓	容性	升高 ↑
S 增加 ↑	增加 ↑	容性	升高 ↑
	减小 ↓	感性	降低 ↓

4.2 天线尺寸的确定

为精确调谐印制倒 F 型天线,需综合考虑 L , H 和 S ,只要适当选取参数,便可以使天线谐振在任意频率上。此时,不需额外使用任何阻抗匹配网络,天线的输入阻抗就已非常接近 50Ω 纯电阻,从而实现与微波传输线的阻抗匹配,这为天线尺寸的设计提供了极大的自由度和灵活性。

以基于蓝牙构成的 WHAN 为例,假设由于电路板面积的限制,需缩短 L 和 H ,为保证天线 2.45 GHz 的谐振频率不变,并保持天线输入阻抗的纯电感性质,可以同时适当缩短间距 S ,以抵消 L 和 H 对谐振频率和输入电抗的影响,即

$$\begin{aligned} L \downarrow, H \downarrow &\Rightarrow f > 2.45 \text{ GHz}, X_{\text{IFA}} < 0 \\ S \downarrow &\Rightarrow f < 2.45 \text{ GHz}, X_{\text{IFA}} > 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad f = 2.45 \text{ GHz}, X_{\text{IFA}} = 0 \quad (23)$$

另外, S 与 H 的缩短都会导致天线的输入电阻变小, 此变化趋势恰好可以抵消 L 缩短使天线输入电阻变大的趋势, 即

$$\left. \begin{array}{l} S \downarrow, H \downarrow \Rightarrow R_{\text{IFA}} < 50 \Omega \\ L \downarrow \Rightarrow R_{\text{IFA}} > 50 \Omega \end{array} \right\} \Rightarrow R_{\text{IFA}} = 50 \Omega \quad (24)$$

这样天线的横截尺寸可以设计得很小, 以适合信息家电小型化的要求, 但间距 S 所能缩短的程度受到机械加工精度和天线工作带宽的限制^[14].

根据蓝牙电路板面积的要求, H 需为 5 mm 左右, 表 2 为在该高度条件下, 天线的谐振频率随 S , H , L 变化的仿真结果.

由式(23)和(24)可知, 为降低 L 需减小 S , 因此选择表 2 中较小的尺寸 $S = 3.0 \text{ mm}$ 及 $H = 5.3 \text{ mm}$, 与此相应的 $L = 18.1 \text{ mm}$, 如图 3 所示, 其中天线的各处线宽均相等, 且选择为与特性阻抗是 50Ω 的微带线的线宽相同. 当板材为普通的 FR-4 时, 其相对介电常数约为 4.5, 如果板厚取 0.6 mm, 则微带线的线宽即天线的线宽约为 1.0 mm 左右. 在天线对地短路臂到水平臂之间的 90° 转角位置的处理, 采用了微波电路中常用的切角法.

表 2 尺寸参数对天线谐振频率的影响

S/mm	H/mm	L/mm	f/GHz
5.0	3.5	18.1	2.50
5.0	7.1	18.1	2.40
5.0	5.3	17.0	2.55
5.0	5.3	19.2	2.30
3.0	5.3	18.1	2.30
7.0	5.3	18.1	2.60

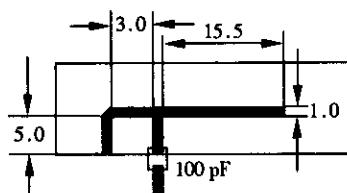


图 3 天线尺寸的确定(单位 mm)

5 测试结果

按图 3 的结构及尺寸制作并调试天线, 为方便测量, 将一特性阻抗为 50Ω 的同轴电缆的内导体焊接在与天线馈电点相连的 50Ω 微带线上, 外导体就近接地, 在同轴电缆的另一端焊 SMA 接头并连到矢量网络分析仪 ZVRE(ROHDE & SCHWARZ 公司 9 kHz ~ 4 GHz) 上.

回损的测量结果如图 4 所示, 该天线谐振在 2.4 GHz 频率附近, 且有良好的阻抗匹配性能. 其

中电压驻波比为 2.0, 即回损为 -9.5 dB 的带宽约为 490 MHz, 可完全覆盖蓝牙所工作的 ISM 频段: 2.400 ~ 2.484 GHz.

于微波暗室中, 该天线在 2.45 GHz 时的方向图测试结果如图 5 所示. 如按图 2(c)选取坐标系, 则图 5(a), (b) 和 (c) 分别代表立体方向图的 $x-z$ 截面、 $y-z$ 截面和 $x-y$ 截面. 可以看出, 天线比较接近等向辐射特性, 尤其是 E_θ 的 $x-y$ 截面和 E_φ 的 $y-z$ 截面. 这适用于各设备之间相对位置无法预知的 WHAN 系统.

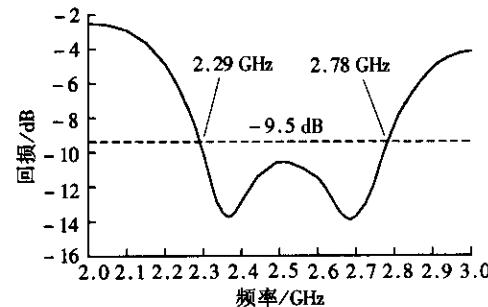


图 4 IFA 天线回损的测量结果

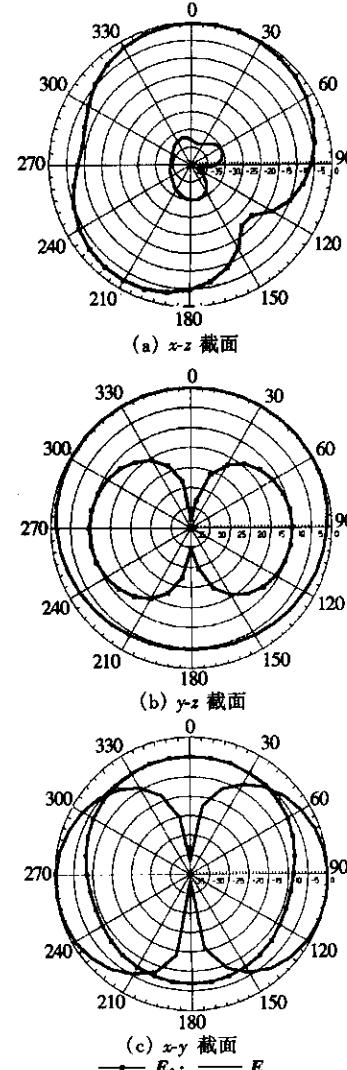


图 5 2.45 GHz 时方向图的测试结果

另外,图5(a)的x-z截面方向图中,电场 E_x 分量比 E_y 分量大30 dB左右,可以认为是线极化方式,而其余方向图中 E_x 分量和 E_y 分量差值均不到20 dB,为椭圆极化方式,因此该天线可同时接收垂直和水平极化电磁波,完全满足前述的WHAN对天线交叉极化的要求。

为评估天线在室内环境中的工作性能,本文做如下实验:在分别用外接单极鞭状天线和本文的印制倒F型天线同时放置在蓝牙及802.11a收发设备双方,测试传输数据的误包率,整个实验都是在有许多家具的典型居住环境内进行的。实验表明,外接鞭状天线只有在收、发天线相互平行(如同时垂直地面)时,其性能才略优于印制倒F型天线,而在其他情况时,后者性能均优于前者。

6 结语

通过上述分析及仿真研究可知,印制倒F型天线的设计简洁、灵活,可在先根据电路板实际尺寸大小选定L和H后,再确定S的大小,可方便地进行双频改造^[15],同时适用于2个不同的频段,成本低、效率高、结构紧凑、馈电方便;具有等向辐射特性和交叉极化方式。因此印制倒F型天线完全适于WHAN室内电波传播的应用环境。本文天线目前已应用于各蓝牙系列产品当中,使用状况良好,且其各系列产品“低功率无线接入系列设备的研制及产业化”获2004年度江苏省科学技术进步一等奖。

参考文献(References)

- [1] 刘彤,沈连丰,顾燕.家庭信息网络解决方案的研究[C]//隆克平.中国通信学会第九届全国青年通信学术会议论文集.北京:电子工业出版社,2004:1320-1325.
Liu Tong, Shen Lianfeng, Gu Yan. The Research of Home Network's Solution[C]//Long Keping. 9th National Youth Communication Conference. Beijing : Publishing House of Electronics Industry , 2004 : 1320 - 1325.(in Chinese)
- [2] 王增和,王培章,卢春兰.电磁场与电磁波[M].北京:电子工业出版社,2001:99-100.
- [3] Kyritsi P, Cox D C. Propagation characteristics of horizontally and vertically polarized electric fields in an indoor environment: simple model and results[J]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2001, 3(10):1422 - 1426.
- [4] Neelakanta P S, Chatterjee R. Antennas for information super skyways: an exposition on outdoor and indoor wireless antennas[M]. Hertfordshire, England : Research Studies Press LTD , 2004 : 399 - 474.
- [5] 刘彤,沈连丰,叶芝慧.WPAN系统中LNA设计的串联反馈仿真优化法[J].电路系统学报,2003,8(6):33-38.
Liu Tong , Shen Lianfeng , Ye Zihui. Serial feedback optimization for the design of LNA used in WPAN systems [J]. Journal of Circuits and Systems , 2003 , 8 (6) 33 - 38. (in Chinese)
- [6] 范寿康,卢春兰,李平辉.微波技术与微波电路[M].北京:机械工业出版社,2003:16-17.
- [7] Franco D P. Networks and devices using planar transmissions lines[M]. Boca Raton :CRC Press ,2000 :11 - 15.
- [8] King R , Harrison C W , Denton D H. Transmission-line missile antennas [J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation , 1960 , 8(1) 88 - 90.
- [9] Godara L C. Handbook of antennas in wireless communications[M]. Boca Raton :CRC Press , 2002 : 60 - 89.
- [10] Guertler R J F. Isotropic transmission-line antenna and its torpid-pattern modification [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation , 1977 , 25(5) :386 - 392.
- [11] Fan M Y , Feng Z H , Zhang X X. Dual frequency double-branch printed inverted-F antenna[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium , 2002 , 3(6) 508 - 511.
- [12] Soras C , Karaboiakis M , Tsachtsiris G , et al. Analysis and design of an inverted-F antenna printed on a PCMCIA card for the 2.4 GHz ISM band[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine , 2002 , 44(1) :37 - 44.
- [13] Tie T , Zhou Z. Application of planar inverted-F antenna for Bluetooth[C]//Proceedings of ICCT. Beijing , 2003 :1230 - 1233.
- [14] Ali M , Hayes G J. Analysis of integrated inverted-F antennas for Bluetooth applications[C]//IEEE-APS Conference on Antennas and Propagation for Wireless Communications. Waltham MA , 2000 :21 - 24.
- [15] 刘彤,沈连丰,傅永生.适用于WPAN/WLAN的一种新型双频IFA印制天线[J].微波学报,2004,20(2):82-86.
Liu Tong , Shen Lianfeng , Fu Yongsheng. A novel dual band printed IFA for WPAN/WLAN system [J]. Journal of Microwaves , 2004 , 20(2) :82 - 86. (in Chinese)

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>