近场宽带电场耦合天线的高频结构模拟器软件仿真及性能分析*

杨勇[1)] 孙伟强[1)] 庄虔伟[1)] 冯涛[1)] 许胜勇[1)†] 解思深[2)]

1) (北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2012 年 4 月 16 日收到; 2012 年 4 月 24 日收到修改稿)

近场宽带电场耦合天线是一种新型的短距离、高速无线通信天线, 它是索尼公司力推的近距离高速无线通信技术 ——Transferjet^{TM} 的工作天线. 使用高频结构模拟器软件, 对一种典型的近场宽带电场耦合天线进行了参数化的结构设计; 通过仿真模拟, 分析短截线的线长和线宽, 以及耦合电极的面积对天线中心频率和工作带宽的影响; 分析了天线间的距离和夹角, 以及耦合电极的面积, 对天线传输损耗和性能的影响. 设计了一个满足 Transferjet^{TM} 技术指标的小尺寸天线, 给出了性能仿真结果.

关键词: 天线, 近场, 电场耦合, 计算机模拟

PACS: 84.40.Ba, 31.30.jp, 41.20.Jb, 87.15.A–

1 引 言

近场宽带电场耦合天线是一种新型的无线通信天线, 它在近距离高速保密通信方面具有非常广阔的应用前景. 它由索尼公司最先提出 [1], 并申请了首个美国专利 [2] 和中国专利 [3], 此后相关的研究报道一直处于低调状态. 索尼公司已经联合几十家电子企业, 组成了技术联盟, 并将其命名为 Transferjet^{TM} 技术 [4].

图 1 给出使用该种天线的 Transferjet^{TM} 技术在工作距离、传输速度和使用便捷性上与各种常见无线通信技术的比较, 均表现出非常优异的技术指标和性能. 总体来说, Transferjet^{TM} 技术将超带宽无线通信 [5] (ultra-wide band, UWB) 的超高传输速率和近场通信技术 [6] (near field communication, NFC) 的便捷性有机结合在一起, 最高数据传输速率可达 560 Mbps, 有效传输速率达 375 Mbps[4], 是目前所有无线通信技术中最高的; 它有非常近的工作距离, 在几个厘米以内; 它还有非常低的传输功耗, 发射功率在 −70 dBm/MHz 以下.

由于使用感应电场, 其在周围介质存储能量而不是向外辐射能量, 只有当另一个天线靠近时, 才会发生能量的传递 [4]. 从这两个方面来看, 此种天线功耗低, 避免对人体的电磁辐射; 同时, 天线产生的耦合电场是非极化的, 因此当两个天线通信时, 非常容易实现连接, 不会因为角度的不同使信号强度发生剧烈变化; 这也使得天线收发系统的动态范围收窄易于设计.

特别需要指出的是, 由于该天线利用近场电场耦合进行信息的传递, 而近场电场的衰减与距离的二次方成正比, 因此它的信号衰减非常快, 在物理距离上保证了信息传递的安全; 也不会对周围其他无线通信设备造成影响, 不受日本、欧洲、美国、韩国等其他国家对频谱资源的严格管制, 可以大大地拓展其应用的领域; 就像在整个地球上或国家内

* 科技部第七期中国-新加坡联合研究计划 (批准号: 2011DFA51450) 和国家自然科学基金 (批准号: 11074010) 资助的课题.

† E-mail: xusy@pku.edu.cn

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society

分配频谱资源, 利用该天线可以在一个非常小的物理空间内, 根据需要任意分配相应的频谱资源, 实现 “在小世界中拥有频谱的金矿”.

Transferjet^{TM} 技术在应用层面, 首先可以用于各种无线移动终端, 在手机、相机、DV、MP3 等终端之间进行数据的高速率近距离无线互传, 最终也可扩展到高清电视、电脑、打印机等固定终端等设备 [4].

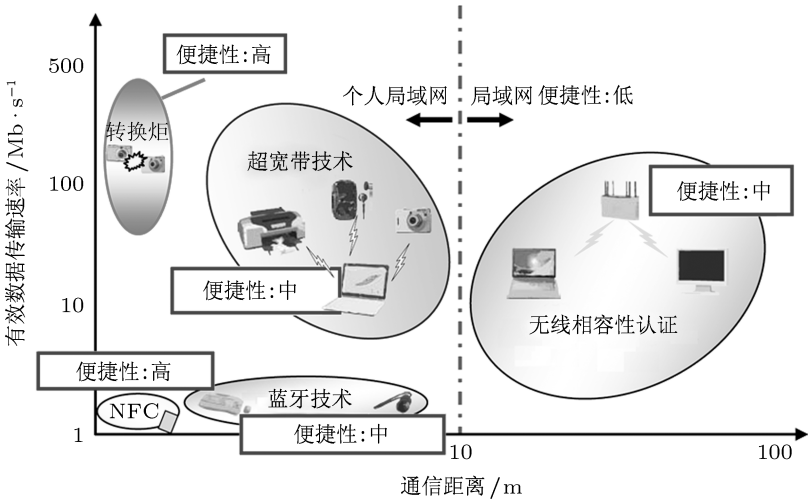

图 1 Transferjet^{TM} 技术与其他无线通信技术的比较 [4]

2 天线原理

天线的设计在 Transferjet^{TM} 技术当中占据着非常重要的地位. 传统的天线工作于远场 [7]: 在工作距离远远大于信号波长时, 天线可看成一个电偶极子 [8,9]. 极坐标系下, 其场表达式如下 [10]:

$$E_R = \frac{p\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{2\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{R^3}+\frac{\mathrm{j}k}{R^2}\right)\cos\theta, \tag{1}$$

$$E_\theta = \frac{p\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{R^3}+\frac{\mathrm{j}\boldsymbol{k}}{R^2}-\frac{\boldsymbol{k}^2}{R}\right)\sin\theta, \tag{2}$$

$$H_\Phi = \frac{\mathrm{j}\omega p\mathrm{e}^{-\mathrm{j}kR}}{4\pi}\left(\frac{1}{R^3}+\frac{\mathrm{j}k}{R}\right)\sin\theta, \tag{3}$$

其中, R 表示距离, $\boldsymbol{k}$ 表示波矢量, p 表示电偶极子的动量, ω 表示频率. 在距离远远大于工作波长的时候, 纵向场分量 E_R 要远小于 E_θ, H_Φ, 可以忽略 E_R 而只剩下横向场分量. 而在横向场分量 E_θ, H_Φ 的表达中, 又可以忽略与 R 的二次方和三次方成反比的量, 那么表达中就只剩下与距离的一次方成反比的量. 因此, 远场工作的天线, 其信号强度与距离一次方成反比.

近场宽带电场耦合天线与传统天线不同, 它没有利用辐射场分量工作, 而是利用在天线工作波长相近周围区域的感应场工作, 感应场以周围空间电磁储能形式存在. 近场宽带电场耦合天线就是使用电场纵向分量 E_R 中与 R 平方成反比的感应场工作, 即 $\mathrm{j}k/R^2$ 分量. 从能量的角度, 它是使用周围电磁储能进行信号的传输, 因此, 天线设计的一个重点就是如何有效地抑制远场辐射, 增强近场电磁储能.

3 天线结构参数及高频结构模拟器 (HFSS) 软件仿真

图 2 是一种近场宽带电场耦合天线的结构示意图 [1]. 印刷电路板的上表面是微带线, 下表面为参考地, 在微带线的末端通过通孔与地相连, 构成短路短截线; 当信号波长等于 2 倍短截线长度时, 会在短截线上形成驻波, 构成一个谐振单元; 在短截线的中心处振幅最大.

一金属棒的一端与短截线中心相连, 另一端与一金属薄片的中心相连, 该金属薄片则构成天线的耦合电极. 因为短截线的中心处振幅最大, 连接在中心处可增加电流的馈入. 高频电流会在耦合电极上形成电荷的聚集与扩散运动, 在假设参考地为一个无穷大金属导体平面时, 根据镜像原理, 该耦合

电极可以等效成一个偶极子.

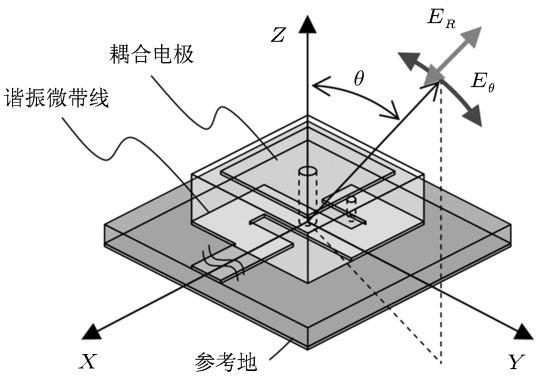

图 2 一种近场宽带电场耦合天线结构 [1]

如图 3 所示, 短截线的设计不是直线形式, 而是折线形式, 这样可以降低设计尺寸. 同时在此种情况下, 上下线的电流走向与中心部分刚好相反, 还可以有效地抵消远场辐射.

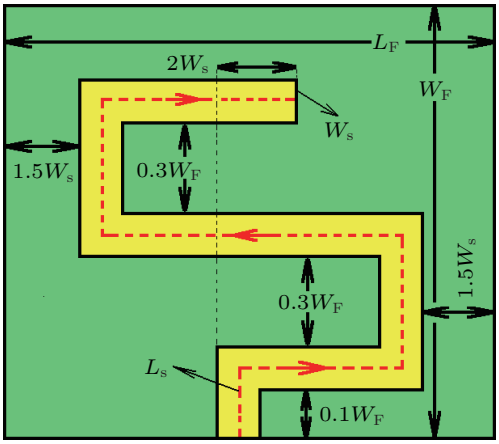

图 3 短截线的结构及其参数

我们使用 HFSS[11] 进行该天线的模拟仿真. 板材采用 FR4 介质板, 背面覆铜作为参考地. 固定 FR4 板的介电特性和厚度, 其介电常数为 4.4, 损耗正切角为 0.02, 厚度为 1 mm. 如图 3 所示, FR4 板的长度为 L_F, 宽度为 W_F; 上表面短截线金属线条长度为 L_s, 宽度为 W_s, 以中心线长度计算, 线条长度满足如下关系式:

$$W_s = 2L_F + 0.7W_F - 4W_s. \tag{4}$$

如图 4 所示, 为了计算天线间的耦合, 模拟中使用两个相同参数的天线, 两天线的耦合电极正对, 其间距为 d. 耦合电极的长度为 L_c, 宽度为 W_c, 其中心通过金属棒与短截线的中心相连, 与介质板的距离为 h.

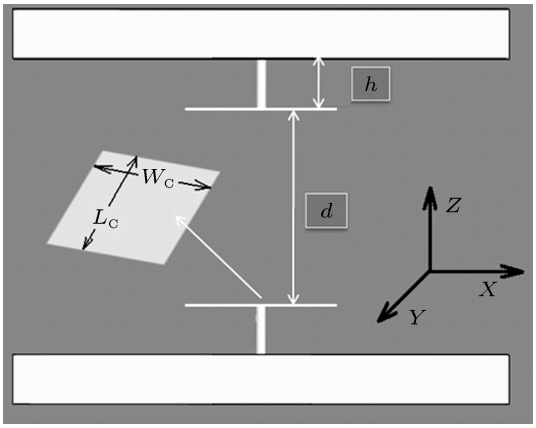

图 4 耦合电极的尺寸和耦合电极距离介电板的高度, 以及两天线间相对位置和间距示意图

设定: FR4 板的长度与宽度相等, $L_F = W_F = 10$ mm; 耦合电极的长度和宽度相等, $L_c = W_c = 7$ mm; 耦合电极与 FR4 板的距离 $h = 2$ mm, 短截线的宽度为 $W_s = 2$ mm; 两耦合电极间的距离为 $d = 4$ mm; 将其作为标准的结构参数. 在下面的模拟过程中, 通过调节一个结构参数固定其他结构参数的方式来获得系统的 S 参数, 表征天线本身的性能和天线间的传输损耗.

4 结构参数对天线中心频率和带宽影响

4.1 短截线线长

在 HFSS 软件中, 我们使用参数化的结构设计; 短截线的长度与介电板的尺寸满足 (4) 式, 通过微调介电板的尺寸 L_F, 进而改变短截线的线长 L_s, 获得模拟结果, 如图 5 所示. 短截线长度增加时, 中心频率降低, 带宽缓慢变宽, 中心频率处的反射系数也缓慢增加.

如表 1 所示, 计算了短截线线长与中心频率的乘积, 发现基本维持在一个常数, 它们与平均值 (119.20) 的偏差在 ± 2.5%以内, 说明天线的中心频率与短截线线长成反比关系.

4.2 短截线线宽

图 6 给出了短截线线宽对天线性能的影响. 可以看出, 短截线的宽度对天线的中心频率和带宽有

非常大的影响, 非常敏感. 当短截线宽度由 2.5 mm 变到 2 mm 时, 0.5 mm 线宽变化使得中心频率改变约 500 MHz; 2 mm 到 1.5 mm 的变化则更大, 中心频率改变超过 1 GHz. 短截线越宽, 其中心频率越高、带宽越窄. 从天线理论角度定性分析, 短截线变宽, 会使得天线阻抗会变小, 馈入的电流会增大, 进而导致品质因子升高, 带宽变窄 [1].

表 1 短截线线长与中心频率的乘积

短截线线长/mm	频率/GHz	线长 × 频率
17.8	6.55	116.59
18.4	6.43	118.31
19.0	6.27	119.13
19.6	6.13	120.15
20.2	6.03	121.81

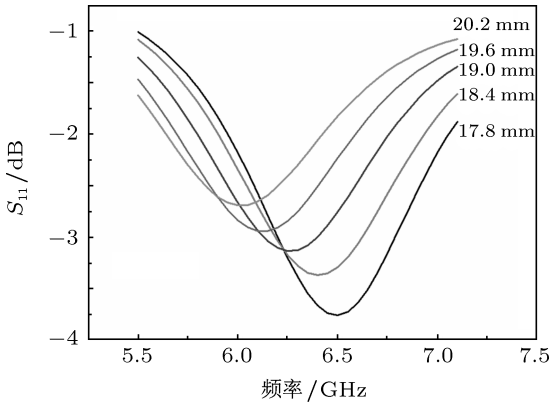

图 5 在不同短截线长度下天线的反射系数

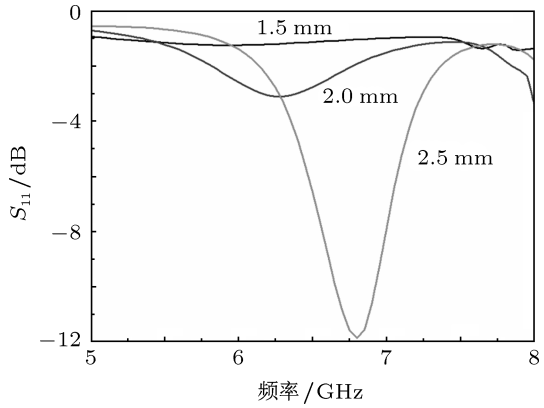

图 6 不同短截线线宽下天线的反射系数

4.3 耦合电极高度

耦合电极高度越低, 其对远场辐射的抑制越大, 辐射能量耗散越小 [2]. 图 7 给出了耦合电极的高度对天线性能的影响. 同短截线线宽参数一样, 它也会同时影响天线的中心频率和带宽. 但从曲线趋势而言, 随着中心频率的增加, 天线的带宽是增加的. 这与短截线线宽的影响特征明显不同, 短截线情况下是中心频率增加带宽减小.

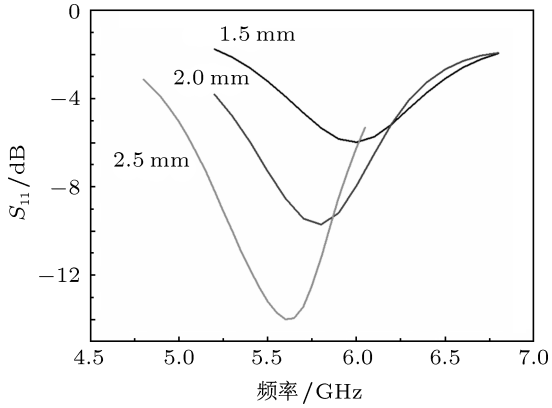

图 7 不同耦合电极高度下天线的反射系数

5 结构参数对天线传输损耗和性能影响

5.1 天线间距离

图 8 给出了两天线在不同距离下的传输损耗, 可以发现, 随着距离的增加, 其传输损耗增加, 信号的带宽也会逐渐降低, 但信号的中心频率基本保持不变. 由 2 mm 到 12 mm 间距, 其带宽约由 1.5 GHz 变为 0.8 GHz, 降低接近 50%, 中心频率由 6.2 GHz 变为 6.3 GHz, 升高约 1.5%.

以 6.2 GHz 中心频率为参考信号点, 图 8(b) 给出了传输损耗与距离之间的关系, 线性拟合的斜率为 –1.94, 非常接近 –2, 在传输损耗单位为 dB 的情况下, 说明传输损耗与距离的 2 次方成反比关系, 这与远场天线中耦合信号强度与 1 次方距离成反比关系明显不同, 印证了该天线使用近场感应场的工作模式.

5.2 耦合电极面积

该天线主要通过电场耦合进行信号的传输, 类似平行板电容, 耦合电极如同平行电容板. 平行板的面积越大, 电场通量越大, 传输信号的强度也就越大. 分别设定耦合电极的面积为 5, 6 和 7 mm 边

长的正方形, 图 9 给出了不同耦合电极尺寸下天线的传输损耗. 可以发现耦合电极的面积越大, 传输损耗越小, 这与上文的假设推理在定性上一致. 耦合电极面积的改变对工作带宽的影响较小.

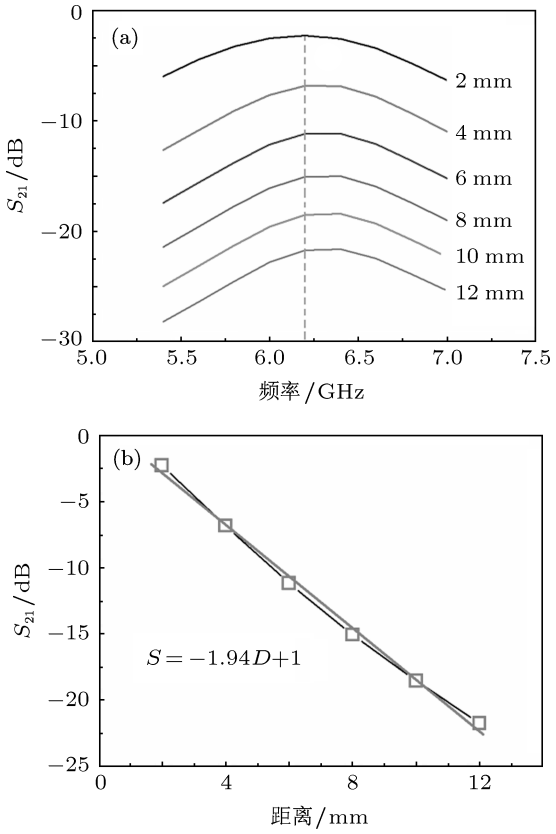

图 8 (a) 不同耦合电极间距下的传输损耗; (b) 中心频率 6.2 GHz 处不同耦合电极间距下的传输损耗及线性拟合

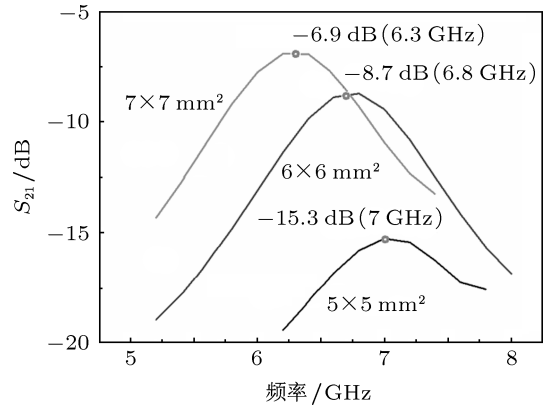

图 9 不同耦合电极尺寸下的传输损耗

5.3 天线间角度

近场宽带电场耦合天线的另一个突出特点是它的非极化特性. 如图 4 中所示, 我们以底部天线的参考地平面为 X-Y 平面, 以连接耦合电极和参考地的金属棒方向为 Z 轴方向, 沿 Y 轴旋转上部的天线, 分别旋转 15°, 30°, 45°, 获得天线间的传输损耗与 0° 时候结果进行比较, 如图 10 所示.

发现在 0°—30° 范围内偏转, 传输损耗降低较小, 在 1.5 dB 左右, 而在 30°—45° 范围内则有 3 dB 左右的传输损耗. 对于 30°—45° 范围内损耗较大, 我们推测主要原因是过大的角度偏转, 使得耦合电极间间距变化很大, 进而因为耦合电极间间距明显增大造成传输损耗加大.

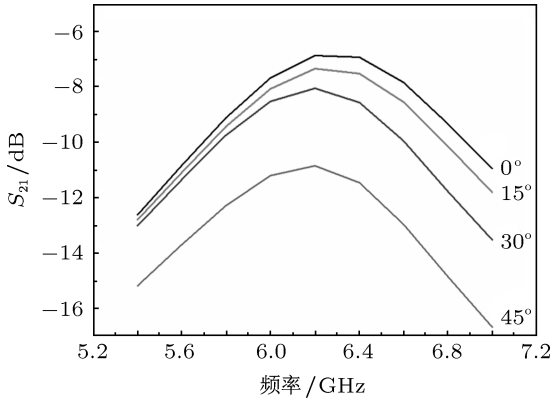

图 10 两天线在不同偏转角度下的传输损耗

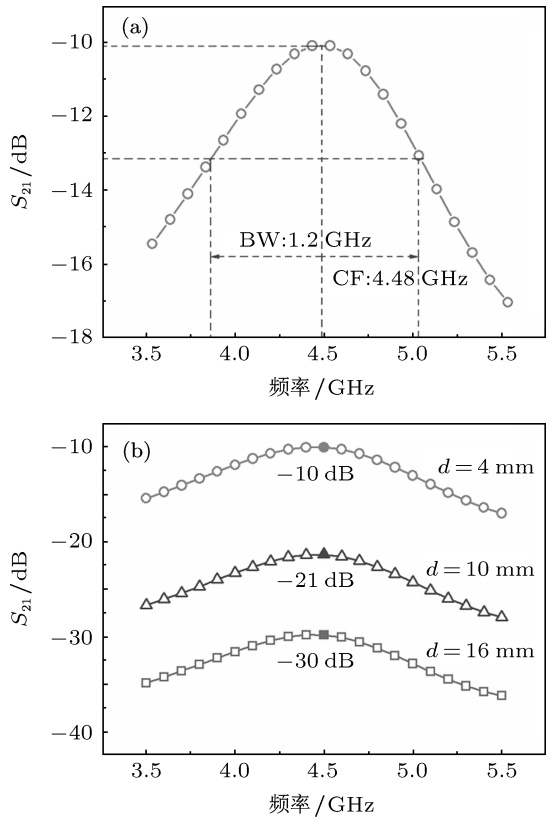

图 11 优化设计后天线性能 (a) 4 mm 间距下天线的传输损耗, BW 表示带宽, CF 表示中心工作频率; (b) 在不同距离下的传输损耗

6 满足 Transferjet^{TM} 技术指标的天线设计

结合现代近场宽带电场耦合通信技术的指标, 我们通过参数优化设计了一个天线. FR4 介质板的尺寸为 12.5 mm×12.5 mm, 中心线短截线线宽为 2 mm, 长度为 25.75 mm. 耦合电极的大小为 7 mm×7 mm, 耦合电极的高度为 1 mm.

如图 11(a) 所示，其中心频率约为 4.48 GHz, 3 dB 带宽为 1.2 GHz 左右, 满足 Transferjet^{TM} 技术 4.48 GHz 中心频率和最小 1 GHz 带宽要求. 图 11(b) 显示两天线正对距离为 16 mm 的时候, 传输损耗约为 –30 dB, 拟合发现传输损耗满足在 15 mm 处小于 –21 dB 的指标要求.

7 结 论

通过本文的参数模拟可以发现, 由于该天线的结构参数较多, 而且工作于近场模式本身受天线间位置参数的影响较大, 因此想非常准确和定量地研究天线的结构和位置参数对天线性能和传输损耗的影响还需要做更加深入的工作. 但是通过一系列的模拟工作, 我们还是发现了一些比较有意义的变化特征. 首先, 耦合片间距离对天线传输损耗的影响显著, 随着耦合片间距离的增加, 传输损耗与距离的平方成反比关系, 距离的改变对天线的中心频率影响很小, 对工作带宽有一定影响; 第二, 两天线在小角度偏转下, 它们之间的传输损耗不会发生较大改变, 从侧面说明该天线的非极化特性, 当偏转角度特别大时, 虽然传输损耗有非常明显的增加, 但是对天线的带宽也影响较小; 第三, 增加耦合片的面积可以比较有效地降低传输损耗, 但同时也会对天线中心频率造成较大影响, 对天线的带宽影响较小; 第四, 短截线的线长主要影响天线的工作频率, 对带宽影响较小; 第五, 短截线的线宽和耦合片的高度都会非常显著地影响天线的中心频率和带宽, 但是它们是一对相互补偿体, 短截线线宽增大会使得中心频率增加的同时带宽减小, 耦合片高度降低会使得中心频率增加带宽增大, 这样两者综合优化则有可能在增加中心频率的同时保持带宽不变.

最后, 设计了一个基本满足 Transferjet^{TM} 技术指标的天线, 进行了性能仿真. 结构的小型化和性能优化还需要更加深入的工作. 通过结构参数的仿真, 找到了一些结构参数对性能影响的变化规律, 这对天线的仿真和优化具有一定的指导意义.

[1] Washiro T, Kuroda S, Tanaka K 2007 *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings* Bangkok, Thailand, December 11–14, 2007

[2] Washiro T 2009 *U.S. Patent* 2009/0231227 A1 [2009-09-17]

[3] TransferJet Consortium 2010 *TransferJet*^{TM} *Overview*: *Concept and Technology Rev.* 1.1. http://www.transferjet.org/tj/transferjet_overview. pdf

[4] Washiro T 2009 *Chinses Patent* 20081061885.8 [2009-04-22] (in Chinese) [和城贤典 2009 中国专利 20081061885.8 [2009-04-22]]

[5] Rao K V S, Nikitin P V, Lam S F 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 3870

[6] Lin C C, Kan Y C, Kuo L C, Chuang H R 2005 *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* **15** 10

[7] Jiang S F, Kong F M, Li K, Gao H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045203 (in Chinese) [蒋双凤, 孔凡敏, 李康, 高晖 2011 物理学报 **60** 045203]

[8] Wang J H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1696 (in Chinese) [王均宏 2000 物理学报 **49** 1696]

[9] Han Z F, Wang J H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 644 (in Chinese) [韩增富, 王均宏 2005 物理学报 **54** 644]

[10] Kraus J D, Marhefka R J 2011 *Antennas*: *For All Applications* (vol. 1) (Beijing: Publishing House of Electronic Industry) p29 (in Chinese) [约翰 · 克劳斯, 罗兰 · 马赫夫克 2011 天线 (上册)(北京: 电子工业出版社) 第 29 页]

[11] http://www.ansys.com/customer/content/content/HFSS_User-Guide.pdf

High frequence structure simulator simulation and performance analysis for nearfield and wide band electric coupling antenna*

Yang Yong[1)] Sun Wei-Qiang[1)] Zhuang Qian-Wei[1)] Feng Tao[1)]
Xu Sheng-Yong[1)†] Xie Si-Shen[2)]

1) (*School of Electrical Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing* 100871, *China*)

2) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

(Received 16 April 2012; revised manuscript received 24 April 2012)

Abstract

Electric field coupling antenna is a new type of antenna that can be used in high speed wireless communication at a very short distance. It is the working antenna for Transferjet^{TM} technology promoted by Sony Corporation. In this paper, we use the high frequency structure simulator to design a typical antenna of this kind with parametric structures. We analyze the influences of the length (L_{s}) and width (W_{s}) of the short stub, the height (H) of coupling electrode on the performance of the antenna corresponding to the centre frequency and bandwidth. We also analyze the effects of the distance (d) and angle (θ) between two antennas and the size of coupling electrode (L_{c}) on transmission loss. Finally, we design an antenna satisfying the technology standards of Transferjet^{TM}, thus demonstrate its working performance.

Keywords: antenna, near field, electrical coupling, computer simulation

PACS: 84.40.Ba, 31.30.jp, 41.20.Jb, 87.15.A–

* Project supported by the 7th China-Singapore Joint Research Project of China's Ministry of Science and Technology (Grant No. 2011DFA51450) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11074010).

† E-mail: xusy@pku.edu.cn