

新型天线技术与电波传播特性研究

冯正和, 杜正伟

(清华大学电子工程系微波与数字通信技术国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 本文介绍了我们近年来在电磁带隙结构、多(单)天线系统、多(单)天线信道特性方面的研究工作和主要研究结果. 主要包括: 电磁带隙结构小型化、宽带化技术, 小型化、多频带/宽频带天线单元, 适用于多输入多输出通信系统的手机多天线系统, 室内外环境下的多(单)天线系统的信道特性等方面的主要研究结果.

关键词: 多天线; 多输入多输出; 电磁带隙; 电波传播

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-007-06

Study on Novel Antennas and Channel Properties of SISO/MIMO Systems

FENG Zheng-he, DU Zheng-wei

(Department of Electronic Engineering, State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Our recent work and results obtained in the fields about electromagnetic bandgap (EBG) structure, multi (single) antenna systems, and the channel properties of multi (single) antenna systems are introduced. The results about the following are introduced: the methods to miniature the structure and broaden the bandgap width of EBG structures, compact wide-band/multi-band antennas, multi-antenna systems suitable for multiple-input multiple-output (MIMO) wireless communications for mobile terminals, and the indoor/outdoor channel properties of SISO/MIMO systems.

Key words: multi antennas; multiple-input multiple-output; electromagnetic bandgap; propagation

1 引言

目前, 世界各国在推动第三代移动通信系统产业化的同时, 已把研究重点逐渐转入三代后 (Beyond 3G) 或 4G 的新一代移动通信技术、无线宽带分组通信技术等的研究, 旨在使无线通信的频谱效率、容量和速率有十倍甚至百倍的提高. 国内外正在大力开发的多输入多输出 (MIMO, Multiple-input multiple-output) 技术^[1] 就是可能的重要技术突破点之一. MIMO 系统在发射和接收端采用多天线以控制信号的空间分布, 在同频、同时条件下利用多天线提供并行的子信道以增加系统容量或通过空间分集以提高信号传输的质量.

MIMO 系统的信道特性和模型均不同于传统的单收发系统, 其信道特性由信道矩阵来表征, 而信道矩阵特性又由相关的参数即信道实际结构 (散射密度、散射体的分布)、MIMO 算法 (编码与信号处理方式)、天线阵列结构及其辐射/极化特性单独或联合作用决定, 无线通信的移动性和时变的本质增加了这些参数的相互作用.

有关 MIMO 的文献虽有很多, 但主要集中在编码、

信号处理方面, 而天线、信道特性方面的研究较少.

电磁带隙 (EBG, Electromagnetic bandgap) 结构是指通过一种介质在另一种介质中周期排列组成周期结构, 从而使某些频率的电磁波完全不能在其中传播. EBG 结构的特性使其可以应用于微波工程的很多领域, 如高 Q 谐振器、高隔离度平面滤波器、功分器、功率放大器、高速电路、天线和吸波材料等. EBG 结构用于天线设计中, 可以作为天线的“地面”或在天线阵天线单元之间加 EBG 结构, 从而避免其上表面波的传播、降低天线的背瓣, 以减少干扰及提高天线的增益, 同时还有望用以改善多天线情况下天线之间的互耦、提高多天线系统的性能.

本文主要介绍了我们近年来在 EBG 结构、多(单)天线系统、多(单)天线信道特性方面的研究工作.

2 电磁带隙结构小型化、宽带化技术研究

EBG 结构易于制备, 其发展非常迅速, 目前已经进入实用化阶段. 但是 EBG 结构由于受其自身特性的限制, 往往尺寸较大、带隙带宽较窄, 这一方面增加了系统面积, 为其在微波电路的集成、移动终端多天线系统

中抑制天线单元之间的互耦等应用带来了很大的困难;另一方面,较窄的带隙带宽也在一定程度上限制了其在微波领域中的广泛应用.因此,设计小型化、宽带化的新型 EBG 结构,成为了目前广泛关注的一个问题.

相比于介质 EBG 结构,金属 EBG 结构的周期比自由空间波长小很多,通过选择合适的介电常数和介质板厚度其周期可以达到波长的十分之一,所以在实际中得到了广泛的应用.目前,两种常见的金属 EBG 即蘑菇形 EBG^[2]和 UC-EBG^[3]结构由于其优越的性能,得到了广泛的研究和应用,但其带隙带宽不够宽、尺寸较大.我们对这两种 EBG 结构的带隙的等效电路进行了分析,分析了其工作原理,从而探索 EBG 结构小型化和带隙带宽宽带化设计的方法.

我们提出了音叉形 EBG 和 F 形 EBG 结构^[4,5].在相同情况下,音叉形 EBG 结构所占的面积仅是蘑菇形的 40%,F 形 EBG 结构在尺寸上减小了 41.6%.EBG 结构小型化设计的另一个行之有效的办法是增大 EBG 结构等效滤波网络的电感加载值.我们提出了螺旋形 EBG 结构^[6],其单元周期是蘑菇形 EBG 结构的单元周期的 36.6%,所占面积的 13.4%.采用平面螺旋电感作为电抗加载还具有很大的灵活性,可以通过改变匝数或者螺旋微带的宽度来改变加载的电感值.在此基础上,我们提出了一种新的展宽带隙带宽的方法——组合单元法^[7],就是把多种具有不同带隙特性的 EBG 结构子单元组合在一起,实现展宽带隙带宽的目的.以金属贴片螺旋电感-蘑菇形 EBG 结构为例,设置螺旋的不同匝数以得到具有不同的带隙频段的子单元结构,仿真结果和实测结果均验证了组合单元法的有效性.

当 EBG 应用到天线的设计中时,对于有较大地面的单天线,在天线的地面采用 EBG 结构,可以避免其上表面波的传播、降低天线的背瓣;对于有较大地面的多天线系统,当天线之间的间距足够大,在天线单元之间的地面采用周期数足够多的 EBG 结构,可以避免地面上表面波的传播,可以改善天线之间的互耦、提高隔离度.我们在微带天线单元之间插入了三列用于削弱表面波的螺旋形 EBG 结构^[6,8],结果表明能够在一定程度上降低工作频率在 EBG 结构带隙范围内的微带天线单元间的互耦.

3 新型天线技术研究

天线是无线通信系统中不可或缺的组成部分,其性能在很大程度上影响着通信系统的整体性能,因此一直以来都是无线通信领域的研究热点之一.

无线通信系统在频谱效率、信息容量和传输速率等方面的发展,对天线提出了更高的要求.天线在向着多频段/宽频带、小尺寸、高效率、低成本、易集成的方

向发展,在由单天线系统向多天线系统的方向发展.

3.1 小型化、多频带/宽频带天线单元

考虑到 ITU(International Telecommunication Union)的频带分配状况及移动通信的发展,需要通信系统能在多个频段同时应用;用户希望同一终端上能够尽可能集成多种无线服务,例如 GPS、蓝牙、WLAN 等业务,因而也要求终端能多频工作.此外,考虑到终端整体尺寸的限制,应用中要求天线小型化并与终端共形;由于传播损耗、多径传输在下一代系统中将会增加,要求天线有尽量高的辐射效率.多频段/宽频带、小尺寸、高效率、低成本、易集成的移动通信终端天线的设计和实现已成为新的研究热点.

我们提出了一种 T 形地平面倒 F 天线(PIFA, Planar inverted-F antenna)^[9],其相对带宽比传统 PIFA 宽,达到了 16.6%,尺寸比传统 PIFA 小;在此基础上提出了一种开槽 T 形地平面 PIFA^[10],可以在不改变天线尺寸的条件下使天线的绝对带宽比 T 形地 PIFA 增加一倍,并且改善频带内端口的匹配, -10dB 阻抗带宽为 670MHz (1950 ~ 2620MHz).

我们提出了一种印刷在印刷电路板(PCB, Printed circuit board)上的平面单极子天线^[11],采用 50 Ω 微带线馈电,通过多路曲折分支线,在较小的体积内实现了天线的多频段工作,满足 GSM900、DCS1800、PCS1900、UMTS2000 和 WLAN 802.11b/g 五频段工作.

我们提出了一种在馈电片上引入折叠结构的 PIFA^[12].由于限制 PIFA 带宽的最主要因素是其馈线的电感,因此可以采用容性耦合馈电来抵消其电感的影响,从而展宽带宽,我们提出了一种在容性馈电片上引入折叠结构的 PIFA,即可以在不改变馈电线电感的情况下单独改变馈电片和辐射片之间的耦合电容,从而使天线输入阻抗的调谐更加灵活有效,实现了宽频带工作,其尺寸较小, -10dB 阻抗带宽为 690MHz (1920 ~ 2610MHz).

我们提出了一种手机尺度的宽带平面天线(T 形地平面 M 形辐射单元)^[13,14],天线的阻抗带宽的频率范围为 870 ~ 2450MHz,相对带宽大于 95%,其电特性满足 GSM、GPS、DCS、PCS、UMTS 和 WLAN 的要求.

3.2 适用于 MIMO 通信系统的手机多天线系统

为了获得多天线系统希望的低空间相关性,对于基站天线,尽管要求天线间距为 11 ~ 13 倍波长,但还是较易实现;但是,对于移动终端如手机来说,其安装空间总共仅为 1 个波长甚至更小,手持终端上多天线的实现成了整个系统实现中最具挑战性的部分之一.

国内外目前对支持 MIMO 功能的多天线的研究不是太多.目前,文献中的多天线系统主要是两天线系统,另外有少量四天线系统.采用的天线形式主要有螺

旋天线^[15]、PIFA^[16]、平面单极天线^[17]、平面双 T 单极天线^[18]、折叠偶极子天线^[19]。采用的分集方式主要有空间分集、极化分集、方向图分集。对多天线系统而言,天线单元之间的耦合往往是不可避免的,对于移动终端来说更是如此。终端上的 MIMO 天线单元间距小,单元之间存在较强耦合,这种耦合降低天线效率、减小信道容量。文献中减小天线单元间互耦的方法主要有在两天线单元间的 PCB 地面上开四分之一波长的槽缝或多节开槽、采用 T 形地面等方法。

在大量的仿真和实验研究的基础上,我们提出了适用于小尺寸移动终端特别是手机的六种多天线系统,包括一种两天线系统和五种四天线系统,都采用了空间、方向图、极化分集的技术,并采用了多种减少天线之间互耦的方法,以改善天线之间的相关性能和增益,具有电小尺寸、频带宽、低成本、易制作、易集成的优点。

3.2.1 两个平面单极天线组成的平面双频两天线系统

我们提出了适用于 MIMO 通信系统的手机两天线系统^[20,21],其 -10dB 工作频带为 1860 ~ 2190、2400 ~ 2490MHz。

该双频两天线系统由印制在印刷电路板上的两个背靠背的结构和尺寸完全相同的单极子天线构成,每个天线单元均可工作在 UMTS 和 ISM-2.4GHz 频段。每个天线单元由三个在馈电微带两侧左右间隔、上下错开的分枝所构成,其中两个较长的分枝用于实现天线单元的双频谐振,另外一个较短分枝用于调整天线单元在两个频段的带宽以及端口阻抗。两个单极天线单元之间的最小距离只有 $0.04\lambda_0$ (λ_0 为 UMTS 频段的中心频率 2050MHz 所对应的自由空间波长),因此为了使天线的两个端口之间在所覆盖的频段内具有较好的隔离度,在地平面上引入了 T 形结构及双倒 L 结构。实测表明,两个天线单元的辐射方向图在空间中基本互补,这样可以实现方向图分集来对抗多径衰落。

3.2.2 适用于 MIMO 通信系统的手机多天线系统

我们提出了由两个 PIFA 和两个单极天线组成的一种四天线系统^[22]、由四个 PIFA 组成的一种四天线系统^[23,24]、由四个平面天线组成的一种四天线系统和由四个平面天线组成的安装在手机盖子上的两种四天线系统^[25,26]。

在文献[26]中,我们提出了一种可安装在手机盖子上的由四个平面单极天线组成的平面四天线系统,其 -10dB 工作频带为 1880 ~ 2200MHz。该四天线系统由分布在 PCB 四个角上的四个单极天线构成,四个天线单元谐振的中心频率均为 2050MHz,且都完全覆盖了 UMTS 频段。在 UMTS 频段内,天线单元 1 和 2 的增益为 4.3dBi,天线单元 3 和 4 的增益为 3.4dBi。通过多种地枝

结构来调整天线的谐振频率、谐振带宽以及增加天线单元之间的隔离度,同时采用了空间、极化和方向图分集。实测表明,四个天线单元的辐射方向图在空间中基本互补,满足 MIMO 通信系统的要求。

4 室内外信道电波传播特性研究

在城市小区等地方,无线电波传播存在丰富的多径。对于使用传统天线方案的数字通信,多径传播造成的频率选择性衰落和码间串扰严重限制了数字通信的带宽和速度。而 MIMO 系统则是利用丰富多径传播环境衰落的独立性来提高信道容量,这使 MIMO 成为无线通信中对抗多径传播的一种有效手段。

现有的 MIMO 信道模型有两类:特定环境传播模型和统计信道模型。特定环境传播模型基于实际传播机制,包括利用麦克斯韦方程的近似求解和相关物理规律,描述信道特性。统计信道模型基于大量实地测量,是对信道特性的统计描述,它也可以根据大量特定环境传播模型的结果推导得出。

在传统无线信道的研究中已经有许多经典模型,但是针对 MIMO 信道本身不同于传统信道的特点的研究还不够充分,需要进一步研究。

为了开展单天线、多天线在实际信道条件下的性能研究,我们采用以直接法为基础的射线跟踪算法编制了适用于室内外通信环境的三维电波传播预测程序,利用该程序开展了室内外信道电波传播特性的仿真研究,在此基础上进行了一系列的测试研究。

4.1 路径损耗的仿真

文献中通常采用场强叠加和功率叠加两种射线叠加方式^[27]。场强叠加就是把接收端所能接收到的射线上携带的电场先做矢量叠加,得到接收端的总电场,然后用这个总电场计算接收功率;而功率叠加是把接收到的各条射线上携带的功率直接做标量叠加,得到接收端的总接收功率。

我们选择文献[28]中的一个室内环境的模型利用我们的仿真程序进行了研究,比较两种叠加方式的仿真结果表明^[29]:(1)场强叠加能够模拟接收端的快衰落现象,它更为真实地反映了接收端的功率变化情况;(2)场强叠加和功率叠加的结果是相符合的,在只需要路径损耗的场合,功率叠加就能够满足要求。

4.2 室内环境下的多(单)天线信道特性

4.2.1 居室环境下的多(单)天线信道特性的仿真研究

子信道之间的相关性对整个 MIMO 系统的性能有很大的影响,但传播环境是否具有丰富散射并没有一个定量的分析方法,我们通过对一个实际的居室环境下的空间相关性进行了仿真研究^[30],在有视线路径和无视线路径两种情况下,对比单天线系统和双天线系

统的信道特性.在仿真中,仿真频率为 2GHz,发射、接收天线均为单极子天线,发射、接收天线高度分别为 2 米和 1.5 米.

我们通过入射电场在天线上激起的开路电压的相关系数来研究信道的相关性,该相关系数越大表明该环境中子信道的相关性越高.

(A) 单天线仿真结果

收发天线不同极化时,无论是透射路径还是有视线路径的情况,接收天线端口开路电压普遍小于相同极化时的 10 ~ 20dB;发射天线位置对接收天线端口开路电压的影响不明显;无视线路径的区域衰落比有视线路径的区域严重.

空间相关系数仿真结果:(1)在单发射天线的情况下,发射天线位置的微小变化不会引起空间相关系数的强烈变化;(2)有视线路径的区域中空间相关系数比无视线路径区域的大;(3)同是无视线路径的区域,不同的房间距离会改变不同天线上接收信号之间的相关性;(4)正交极化天线组接收时,两根天线上端口电压的相关系数在 10^{-5} 量级,说明在室内环境中,环境的交叉极化是很小的,相关性非常低.仿真结果表明,虽然发射天线位置的微小变化对电场分布和空间相关系数的影响都不是很大,但不同极化方向的接收天线上的衰落情况有很大的不同,可以利用这一点,在多对收发天线之间构建低相关性的子信道.

(B) 双天线仿真结果

在有和没有视线路径的各房间中,天线间距为 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 、 $3\lambda/4$ 三种单极子双发射天线发射时,接收天线处电场分布情况有类似的形式,但随着天线组离墙壁越来越远,空间中的电场分布呈现出深衰落区域减小的趋势.

在双发射天线情况下也存在放置在房间中部的天线在空间中引起较均匀的电场分布.当发射天线的间距增大时,各环境中的空间相关系数普遍比单天线情况下要小.

4.2.2 实验室环境下的多天线信道特性仿真与测试研究

实验室环境是 MIMO 天线实用的另一类重要环境.我们开展了实验室环境下的信道特性的仿真和测试研究^[31].实验室房间高 3 米,实验台高度 81cm,实验台间隔板高度 121cm,发射天线高 1.5 米,接收天线高 1.5 米.

仿真得到的路径增益数据表明,室内接收点相距 $1/3$ 波长以上后包络相关性较低.

仿真的实验室的实际环境中有一堵玻璃墙壁,有两个木头门,有 4 扇窗,有大量金属反射体实验仪器,而且尺寸小,仿真程序不能完全模拟,所以我们进行了实际测量.

MIMO 信道测量是 MIMO 信道模型建立和验证中的重要步骤.研究 MIMO 信道中独立的空分信道数量及其特性需要对信号在正交极化方向的分量实时测量,所以研制了一套紧密低耦合 3 极化的 MIMO 天线系统^[32].该种多天线由 X、Y、Z 方向的三个偶极子组成,各偶极子相位中心间距小于 $1/6$ 波长,各天线端口之间耦合小于 -15dB,交叉极化小于 -10dB.

用所设计的紧密低耦合多极化 MIMO 天线对以上实验室环境进行了信道测量,从测量数据中提取 MIMO 信道模型的关键参数.假设室内信道为准静态信道,采用 2 根发射天线,发射频率为 2.075GHz,用所设计的天线作为接收天线,测量不同位置, X、Y、Z 三个极化方向上接收信号的复包络,进而计算出不同位置 and 不同极化方向上接收信号的空间相关性.结果表明,在不同的极化方向上接收信号的相关性小于 0.2,可以提供独立的自由度.当接收天线距离等于 $1/3$ 波长时,接收信号的相关性也小于 0.25.因此,天线单元之间的距离并不是决定天线接收信号相关性的关键,只要方向图设计合适,单元间距很小也能获得很低的接收信号相关性.

4.2.3 居室环境下的超宽带多天线信道特性仿真研究

UWB MIMO 系统可以被简单地定义为在发送端和接收端都采用多天线的超宽带链路系统.

我们采用时域射线跟踪算法,根据时域几何光学理论(GO)和时域一致性绕射理论(UTD),对前述电波传播特性仿真软件进行了修改,使之可进行时域计算,并利用该程序对居室环境下的 UWB MIMO 信道特性进行了仿真,得到了以下结论^[33]:在居室环境中,采用双发射天线对深衰落情况有所改善,但双发射天线引起的快衰落现象比单发射天线严重;采用多径接收的方法可以改善室内信号分布性能;使用垂直极化发射天线时,垂直极化接收的场强较强;发射天线放置在房间中部比房间一端时的信道空间相关性低,双发射天线比单发射天线时的信道空间相关性低.

4.3 室外(校园)环境下的多天线信道特性仿真研究

我们以清华大学校园作为小区,构造了一个 2×2 的仿真 MIMO 系统,两个基站天线分别放在两栋宿舍楼上,移动终端多天线在一条有代表性的道路上移动,分别经历视距、非视距、视距和非视距混合 3 种传播环境.

我们仿真了三种情况的终端天线.仿真结果表明,在小区环境中,移动终端小天线间距条件下 MIMO 天线也比单天线信道容量有显著提高.

5 结束语

本文主要介绍了我们近年来在 EBG 结构、多(单)天线系统、多(单)天线信道特性方面的研究工作.尽管国内外在以上各个方面都已开展了大量的研究工作,

但要满足未来恶劣无线通信环境和有限频谱带宽下移动通信高容量、高数据率、高覆盖率、高频谱效率、高可靠性的要求,还需要开展大量的研究.具体地说,EBG 结构的小型化、带隙带宽的宽带化,高效率、多频段/宽带、低成本、电小尺寸移动通信终端天线,是无线通信发展中不断追求的目标;宽带自适应 MIMO 移动终端多天线系统是多天线的发展方向;复杂电磁环境下的电波传播的时频域分析、电磁构建中的多天线系统特性与信道的关系还需要进行深入的研究.

参考文献:

- [1] Iospan Wireless, Inc. MIMO: the preferred choice for wireless last-mile access[A]. WCA Technical Symp[C]. New York: IEEE, 2002. 1-8.
- [2] D Sievenpiper, L Zhang, R F J Broas, N G. Alexopolous, E Yablonovitch. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE Trans on MTT, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [3] F Yang, K Ma, Y Qian, T Itoh. A uniplanar compact photonic bandgap (UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits[J]. IEEE Trans on MTT, 1999, 47(11): 1509-1514.
- [4] L Yang, M Fan, F Chen, J She, Z Feng. A novel compact electromagnetic bandgap (EBG) structure and its applications for microwave circuits[J]. IEEE Trans on MTT, 2005, 53(1): 183-190.
- [5] L Yang, Z Feng. Advanced methods to improve compactness in EBG design and utilization[A]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium[C]. New York: IEEE, 2004. 3585-3588.
- [6] L Yang, M Fan, Z Feng. A spiral electromagnetic bandgap (EBG) structure and its application in microstrip antenna arrays[A]. 2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC 2005)[C]. New York: IEEE, 2005. 2121-2124.
- [7] 张丰敏, 杜正伟, 王蕾, 龚克. 一种展宽电磁带隙结构带隙带宽的新方法[J]. 电子学报, 2007, (6A): .
Zhang Fengmin, Du Zhengwei, Wang Qiang, Gong Ke. A novel method to broaden the bandwidth of EBG structures[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, (6A). (in Chinese)
- [8] L Yang, Z Feng, F Chen, M Fan. A novel compact electromagnetic bandgap structure and its application in microstrip antenna arrays[A]. 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest[C]. New York: IEEE, 2004. 1635-1638.
- [9] F Wang, Z Du, Q Wang, K Gong. Enhanced-bandwidth PIFA with T-shaped ground plane[J]. Electronic Letters, 2004, 40(23): 1504-1505.
- [10] X Jing, Z Du, K Gong. Bandwidth enhancement design of PIFA with slotted T-shaped ground plane[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2006, 48(10): 2106-2108.
- [11] X Jing, Z Du, K Gong. A compact multiband planar antenna for mobile handsets[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, 5: 343-345.
- [12] Y Ding, Z Du. Planar inverted-F antenna with folded capacitive feed structure[A]. Proceeding of the 2006 Asia Pacific Microwave Conference (APMC 2006)[C]. New York: IEEE, 2006. 207-210.
- [13] 杜正伟, 龚克. 宽带无线通信移动终端平面天线[P]. 中国专利申请号: 200510012070. X; 公开号: CN 1710748A; 公开时间: 2005-12.
- [14] Z Du, K Gong, J S Fu. A novel compact wide-band planar antenna for mobile handsets[J]. IEEE Trans on AP, 2006, 54(2): 613-619.
- [15] H T Hui. Practical dual-helical antenna array for diversity/MIMO receiving antennas on mobile handsets[J]. IEE Proc-Microw Antennas Propag, 2005, 152(5): 367-372.
- [16] M Manteghi, Y Rahmat-Samii. A novel miniaturized triband PIFA for MIMO applications[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2007, 49(3): 724-731.
- [17] K J Kim, K H Ahn. The high isolation dual-band inverted F antenna diversity system with the small N-section resonators on the ground plane[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2007, 49(3): 731-734.
- [18] G A Mavridis, J N Sahalos, M T Chryssomallis. Spatial diversity two-branch antenna for wireless devices[J]. Electronics Letters, 2006, 42(5): 266-268.
- [19] S W Su, J H Chou, T Y Wu. Internal broadband diversity dipole antenna[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2007, 49(4): 810-812.
- [20] Y Ding, Z Du, K Gong, Z Feng. A novel dual-band printed diversity antenna for mobile terminals[J]. IEEE Trans on AP, 2007, 55(7): 2088-2096.
- [21] 丁元, 杜正伟, 龚克, 冯正和. 移动终端双频平面两天线系统[P]. 中国专利申请号: 200710062860. 8, 申请时间: 2007-01.
- [22] 王非凡, 杜正伟, 王蕾, 龚克. 移动终端多天线系统[P]. 中国专利申请号: 200510012072. 9; 公开号: CN 1710749A; 公开时间: 2005-12.
- [23] 颜罡, 杜正伟, 龚克, 王蕾. 多天线系统中的地面缩短型 PIFA 单元[P]. 中国专利申请号: 200510080304. 4; 公开号: CN 1702912A; 公开时间: 2005-11.
- [24] 颜罡, 杜正伟, 龚克, 王蕾. 用于多输入多输出无线通信终端的四平面反转 F 天线系统[P]. 中国专利申请号: 200510012071. 4; 公开号: CN 1728456A; 公开时间: 2006-02.
- [25] 杜正伟, 龚克. 用于多输入多输出通信系统移动终端的平面四天线系统[P]. 中国专利申请号: 200510012069. 7; 公开号: CN 1728455A; 公开时间: 2006-02.

- [26] 丁元, 杜正伟, 龚克, 冯正和. 移动终端四天线系统[P]. 中国专利申请号: 200710064293.X, 2007-03.
- [27] V Erceg, Jr A J Rustako, R S Roman. Diffraction around corners and its effects on the microcell coverage area in urban and suburban environments at 900 MHz, 2GHz, and 6GHz [A]. 1994 IEEE GLOBECOM. Communications: The Global Bridge. Conference Record (Cat. No. 94CH34025) [C]. New York: IEEE, 1994. 1: 52 - 57.
- [28] S Y Tan, H S Tan. Modeling and path loss measurements for microcellular communications in a corridor complex[J]. Electronics Letters, 1994, 30(24): 2008 - 2010.
- [29] Y Li, Z Du, K Gong. Comparison of different calculating methods for path loss in ray-tracing method[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT' 04 [C]. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2004. 182 - 184.
- [30] 李英华. 室内环境 MIMO 信道仿真[D]. 北京: 清华大学电子工程系, 2005. 23 - 98.
- [31] 颜罡. MIMO 系统中的多天线设计[D]. 北京: 清华大学电子工程系, 2006. 46 - 48.
- [32] G Yan, Z Du, K Gong. A compact orthogonal tripolarized multiantenna with low mutual coupling for MIMO channel measurements[J]. Microwave Opt Technol Lett, 2006, 48(7): 1358 - 1362.
- [33] 李晓光, 杜正伟, 龚克, 冯正和. 超宽带 MIMO 信道建模与仿真[J]. 电子学报, 2007, (6A): .
- Li Xiaoguang, Du Zhengwei, Gong Ke, Feng Zhenghe. UWB MIMO channel modeling and simulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, (6A): . (in Chinese)

作者简介:



冯正和 男, 1945 年生于上海, 清华大学电子工程系教授. 研究方向为无线通讯、RF 及微波技术、电磁场理论与数值方法、智能天线、时空信号处理. E-mail: fzh-dee@mail. tsinghua. edu. cn



杜正伟 男, 1971 年生于四川, 清华大学电子工程系教授. 研究方向为电小天线与电波传播、微波电路、电磁兼容、计算电磁学等. E-mail: zwdu@tsinghua. edu. cn