

文章编号:1007-5321(2011)02-0001-07

移动终端内置天线技术及其进展

黎淑兰, 刘元安, 苏 明

(北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 针对移动终端内置天线的高性能结构、小型化、多波段等技术,综合给出了近年来各种移动终端内置天线的主要研究方向及其应用特点,分析了天线结构、组合方法、带宽增强、加载等影响高性能内置天线的关键技术. 基于移动终端天线的研制结果,给出了小型、多波段和高性能终端内置天线所面临的难点和解决问题的有效方法. 研究表明,虽然先进的加工工艺推动了小型化 2~3 波段天线的可实现性,但 3 个波段以上内置天线的设计将主要依赖天线组合技术. 可以预见,先进的终端天线技术将促进移动终端的广泛应用,以满足无缝、泛在无线移动通信网络发展的需要.

关 键 词: 内置天线; 多频段; 小型化

中图分类号: TN911

文献标志码: A

Research and Progress on Internal Antenna of Mobile Terminals

LI Shu-lan, LIU Yuan-an, SU Ming

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: High performance structure technology, miniaturization and multi-band methods of internal antenna were investigated. The main research orientations and application characteristics of internal antenna in recent years were summarized. The key technology in the design of high performance internal antennas of mobile terminals such as antenna structured method, combinatorial method, bandwidth enhancement, and loaded method were investigated and analyzed. Meanwhile, based on the practices of actual internal antenna production, we discussed the difficulties in miniaturized, multiband and high performance internal antennas and provided some effective solutions. The research indicated that the advanced manufacturing technology has promoted the implementation of the 2-3 bands internal antenna, however, the implementation of three or more bands should mainly depend on the combinatorial method. Predictably, the new technology of internal antenna is coming to the fore which will promote wider application of mobile terminals and meet the future demand for development of seamless, ubiquitous mobile radio communication network.

Key words: internal antenna; multi-band; miniaturization

多网络、多频段和多终端成为近年来无线和移动通信发展的趋势. 为了适应这种发展需要,先进的终端内置天线技术得到了广泛重视并迅速发展. 随着终端支持通信模式的增加,终端内置天线的多

频段化成为基本要求. 另一方面,由于移动终端的体积有限,多功能智能终端等的应用使终端内部留给天线的安装空间反而越来越小,所以终端小型化、平面化、高集成度成为近年来发展的主要方向. 在

收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61001060)

作者简介: 黎淑兰(1976—), 女, 教授, E-mail: shulanlee@sina.com.

这种应用背景下,终端内置天线技术在结构、天线材质、天线形式等方面都取得了很大进展^[1]. 目前,移动终端内置天线的主要形式为平面倒F天线(PIFA, planar inverted-F antenna)和平面单极天线. PIFA天线^[2-5]是应用最早、应用最多的内置天线形式. 这种天线设计简单,易于形成多频段,并且能有效降低手机的 specific absorption rate (SAR)值. 多频段和小型化 PIFA 天线主要通过增加谐振枝节、开槽等技术,改变 PIFA 天线的表面电流分布,形成新的工作频率段;通过曲流技术来增加天线的电长度,实现小型化. 但是 PIFA 天线厚度较大,不宜在超薄型的终端内使用. 平面单极天线技术的应用解决了 PIFA 天线的这一问题,并且带宽更宽,增益更高,其缺点是对环境变化较为敏感,易失谐, SAR 值较高. 平面单极天线的多频段和小型化方法与 PIFA 天线基本相同,但其结构更加多样化^[6-8]. 虽然高性能的天线结构设计使 PIFA 和单极天线在移动终端中得到普遍应用,并满足终端在尺寸和高性能上的要求,但是介质谐振器天线技术^[9]的出现开辟了新的终端天线形式,使终端天线体积更小,与传统金属天线相结合能实现多频段. 目前,终端介质谐振器天线技术还不成熟,成本较高,因而实际应用较少.

1 移动终端天线的建模

为了能更准确地了解天线的辐射行为并有效地调整天线结构参数,以实现预定的天线性能指标,需要建立天线的理论模型. 常见的建模方法包括场理论模型和等效电路模型.

经典的场理论模型是辐射模式模型,利用球面波函数^[10]或柱面波函数^[11]求解麦克斯韦方程组,得到辐射场表达式. L. J. Chu^[10]利用这种方法分析了轴对称的 TM 模,并得到了天线的 Q 值与天线体积间的极限关系,这对于小型化天线的设计来说至关重要. 文献[10]中的建模理论严密,是分析电小天线的经典方法,可以分析少数结构简单的电小天线. 随着电磁场数值计算方法的快速发展,结合上述辐射模式模型可以建立多频段天线的辐射模型.

等效电路模型是将天线等效为集总参数元件,来分析天线的辐射原理和性能^[12-13]. 这种方法适用于分析天线的阻抗特性,有利于射频前端与天线的一体化设计. 利用 Foster 电抗理论^[13]可以对简单的天线建立基本等效电路模型,在此基础上增加一个

增广电路模型可以对更加复杂的天线进行等效电路建模. 目前,对移动终端天线的建模主要是对天线等效电路的建模. 由于内置天线结构复杂,等效电路建模需要考虑天线的具体结构,不能单纯地利用天线的输入阻抗特性进行建模.

2 多频段设计的方法和实现

由于移动终端内置天线需要支持的通信模式越来越多,单纯依靠增加天线个数(一种在早期双模手机上曾经得到普遍应用的方法)实现移动终端的多模式工作会占据大量的内部空间,引起天线之间的相互耦合,而且也会导致终端内部的电磁兼容性变差,因此研制能够工作在多个频段上的内置天线成为技术发展的重点. 多频段技术的基本准则是增加或减少天线的电流路径和谐振模式,使天线增加或改变工作频段,实现的方法主要包括6个方面.

1) 多频谐振枝节方法^[14]. 通过在天线主体上增加直连谐振枝节来实现多频段. 多频谐振枝节的长度一般为新增谐振频率的 1/4 波长,在这个频率上,附加的枝节产生谐振并辐射电磁波.

2) 多频耦合枝节或寄生贴片方法^[2]. 耦合枝节或寄生贴片与天线主体相隔离,利用它们之间的电磁耦合实现多频段. 增加的耦合枝节等效于在原始天线的等效电路上串联或并联了一个谐振电路,通过控制耦合量和耦合贴片的尺寸,可以控制其谐振频率,从而增加相应的频段.

3) 基于开槽的多频方法^[8,15,21]. 在天线上开缝能够改变天线表面局部的电流模式,改变电流模式的区域将产生不同的谐振频段. 本质上,缝隙上的间隔引入了等效附加电容,而沿着缝隙边缘流动的电流则引入了等效附加电感,因此,一个缝隙便能够形成 1 个谐振回路,从而形成 1 个或多个增加的谐振频率.

4) 组合式结构的多频方法^[16-17]. 该方法是谐振枝节多频技术的进一步扩展,但是增加的谐振结构不是简单的枝节,而是具有固定结构形式的天线,因此,该方法实际上是通过 2 个或 2 个以上天线的集成,实现多频段工作. 由于多个天线集成在一起,相互间的耦合作用不可忽视,在设计时必须考虑.

5) 可重构的多频天线^[18]. 通过在天线中内嵌射频开关阵列,该阵列可以具有预设工作模式或自适应工作模式,通过阵列开关的通断状态控制电流

在天线中的流动路径,从而控制天线工作在不同的频段上,实现可重构。

6) 带宽扩展的多模式方法^[19-20]。当2个或2个以上移动通信频段相距较近时,可以设计一个较宽的频带来覆盖所需要的通信频段。带宽扩展的方法很多,如应用较大面积贴片的单极天线或宽槽天线。

在各种多频段设计方法中,应用最广泛的是多频谐振枝节方法,而组合式结构是这种方法的进一步发展。近年来,多位学者利用上述方法设计了可工作在2个或2个以上频段的移动终端内置天线,下面针对其中的典型实例予以介绍。

文献[8]中利用开口槽线的1/4波长谐振特性设计了一种新型的两波段槽天线,该设计通过增加不同长度的槽线来增加谐振点,天线结构如图1所示。天线具有2种长度的3条开口槽线,其中2条相同长度的槽线工作在同一个谐振频段,以增强该频段的带宽;另一条槽线的长度较短,提供较高的谐振频段。槽线长度(l_s)与工作频率的关系为

$$l_s = c / (4f \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}) \quad (1)$$

其中, c 为真空中的光速; ϵ_r 为基板的相对介电常数; f 为谐振点的频率。这种开槽天线设计简单,通过增加不同长度的槽线就能增加多个谐振点。由于槽线在较低的谐振频点长度较长,使天线的长度难以缩短,所以可使用折线槽实现这种天线的小型化。

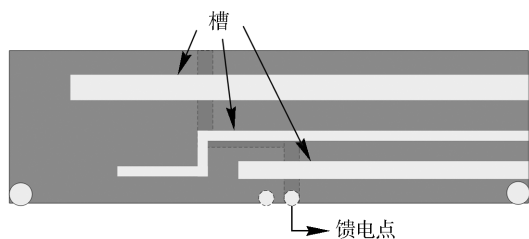


图1 单极槽天线结构

文献[16]中使用组合式天线技术获得多频段特性。该设计将螺旋天线置于弯折的单极天线下方,两者之间通过ABS塑料基板进行隔离,两者的馈电部分通过一个矩形框结构相连,如图2所示,单极天线按照

$$l_a = c / (4f \sqrt{\epsilon_r}) \quad (2)$$

设计。其中, l_a 为单极天线的长度。由于该单极天线具有宽带特性,可以同时覆盖DCS、PCS和UMTS三个频段。而螺旋天线结构是电小天线的一种典型设计,可以覆盖GSM的低端频段。该设计充分利用了

2种天线的特点,实现了4个通信频段的覆盖,同时通过对2种天线的合理放置,实现了紧凑的天线外形。

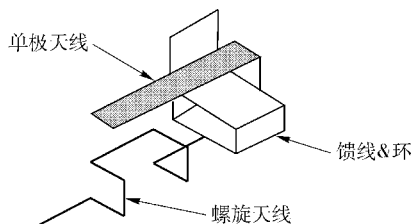


图2 单极与螺旋组合式天线结构

另外一款组合式结构天线^[17]则是单极天线与环天线的结合,如图3所示,左侧为环形结构,右侧为弯折的单极结构。该天线的工作频段可以覆盖GSM、DCS、PCS、UMTS、ISM/BT、WLAN和WiMax 7种通信模式。天线左侧的环形天线结构实际上起到了对右侧弯折单极天线的调谐作用,增大了天线的带宽,使天线能覆盖更多的通信频段。

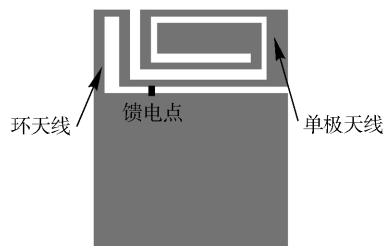


图3 单极与环组合式天线结构

文献[21]中利用开槽方法设计了一款空气介质多频段PIFA天线,其结构如图4所示。该天线利用2个平行的U型槽激发了2个相距极近的频率,实现了2个频段之间的隔离。这种利用近距离平行双槽方法,将槽线激发的电流限制在两槽之间的结构内,增强了该结构产生的谐振,使增加的工作频段能恰好覆盖相应的通信频段,避免了工作频段之外信号的干扰。U型槽加载的矩形贴片尺寸和 f 的设计公式为

$$f = \frac{c}{4(w + l_p)} \quad (3)$$

其中, w 为天线贴片的宽度; l_p 为贴片的长度。该天线第1个谐振频率为1900 MHz,第2个谐振频率为2020 MHz,可以覆盖TD-SCDMA频段。

另一种已经成功商用的天线是folded inverted conformal antenna(FICA)天线^[22]。图5所示为摩托罗拉公司设计的FICA天线。该天线具有对称结构,可利用缝隙来激发不同的工作模式。

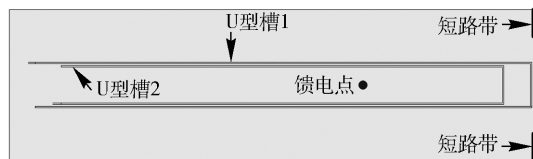


图4 平行U型槽加载 PIFA 天线



图5 moto FICA 天线实物

理论上,上述任一多频段天线的设计方法不是独立的,在设计多频段天线时,既可以利用其中的某种技术,也可将多种技术综合应用,使天线达到最佳性能。

3 小型化设计的方法和实现

移动终端的小型化趋势导致终端内部留给天线的空间越来越少,因此,小型化成为终端内置天线的发展趋势之一。众所周知,天线的体积将直接影响天线的性能,如带宽、增益等。天线体积越小,天线的带宽也就越窄,增益也越低。即使存在这些限制,依然涌现出了多种小型化的设计方法,主要包括5种方法。

1) 基于弯曲折叠结构的方法^[23]。通过弯曲折叠天线结构来增加天线的电长度,使天线可以工作在更低的频段,实现天线的小型化。

2) 基于加载的方法^[24]。加载的方法包括短路加载、电容加载等方法。短路加载的典型应用是PIFA天线,利用镜像原理可将天线缩减一半的体积;而电容加载则通过改变天线的等效电路,使天线低端频率点的阻抗特性随之改变,从而降低天线的工作频段,实现小型化。

3) 基于开槽的方法^[25]。与多频段技术中的开槽方法相同,开槽的方法改变了天线表面的电流路径,不仅能增加谐振点,还能延长天线的电长度,降低天线的谐振频率。

4) 基于分形结构的设计方法^[26-27]。利用分形图形的空间填充性,大大增加了天线的电长度,使天线能有效利用所占空间,提高辐射效率,实现天线的

小型化设计。

5) 基于介质天线方法^[9]。介质谐振器天线不同于传统的金属天线,其辐射体是介质谐振器,尺寸正比于 $\lambda/\sqrt{\epsilon_r}$ 。通过增加介质的介电常数,能使介质谐振的频率更低,从而减小天线的尺寸。

在进行天线的小型化设计时,根据天线的性能要求和终端的内部可用空间,既可以单独使用上述小型化设计方法,也可以相互结合使用。下面针对一些典型的天线小型化设计实例加以介绍。

文献[28]中利用弯曲折叠方法设计了渐变角度折线结构的单极天线,将天线的高度降到15 mm,随后将天线折叠成长方体状立体结构,使天线的宽度也降到12 mm,并设计了互补枝节,增强了天线第2个谐振点的带宽,如图6所示。天线最终的尺寸是15 mm × 12 mm × 7 mm,工作频带分别为886 ~ 966 MHz和1 685 ~ 1 899 MHz,可以覆盖GSM和DCS两个频段。该天线同时利用弯折和折叠2种方法来减小天线的尺寸,利用增加天线高度换取天线剖面尺寸的缩小。弯折折叠的方法能有效地增加天线的电长度,实现天线的小型化。但是,这种方法也容易使同相电流在近距离内反向流动,从而使它们在远场相互抵消,降低天线的辐射效率,同时也导致天线更难匹配。

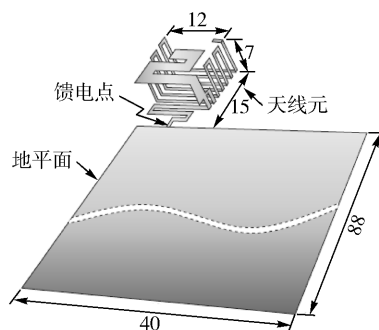


图6 弯曲折叠形式的单极天线结构

短路针/带加载是微带天线小型化的手段之一,可以将天线尺寸至少缩小到1/4波长,PIFA天线是这种技术的典型应用。在此基础上,通过增加容性加载可使PIFA天线尺寸进一步从1/4波长级减小到1/8波长级,小型化作用明显。然而,PIFA天线需要一定的高度来匹配短路结构,高度过低会造成天线效率的下降。为了解决该问题,文献[29]中结合单极天线和PIFA天线的设计思路,在单极天线的合适位置上加加载短路结构,形成了平面的PIFA天线,将天线高度降到2 mm,如图7所示。该设计

也可以看作为一个短路加载的单极天线,同时在单极贴片上结合弯折和开槽的方法,进一步缩小了天线的尺寸。

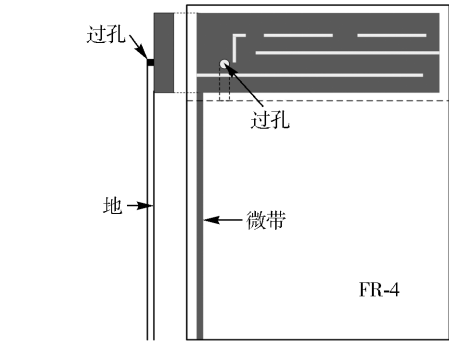


图 7 平面型 PIFA 天线结构

文献[30]中综合利用了短路加载、电容加载和开槽方法,缩减了天线的体积,设计了一款 GSM/DCS 双频天线,天线结构如图 8 所示。天线的低频端小于 800 MHz 时,天线尺寸可缩小至 38 mm × 15 mm,通过对加载电容即折叠贴片的进一步调整,该尺寸还可进一步减小。

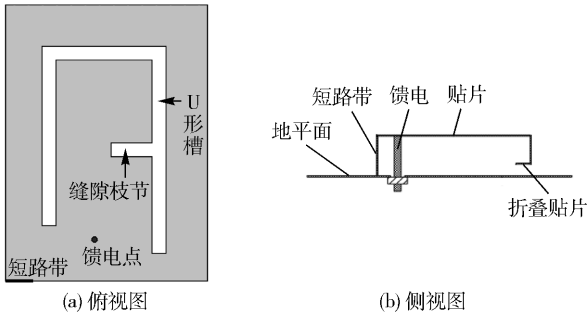


图 8 小型化 PIFA 天线结构

分形图形具有良好的空间填充性。利用分形图形设计天线,可大大增加天线的电长度,实现天线的小型化。文献[26]中利用 Sierpinski 分形结构设计了工作在 2.4 GHz 处的单极天线,如图 9 所示。

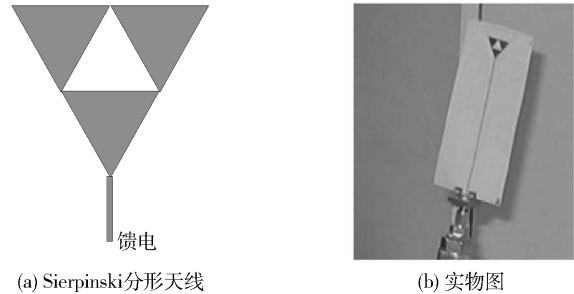


图 9 分形天线结构

4 带内抗干扰性能增强技术

有的通信频带间距较近,如 TD-SCDMA 的 2 个频段 1 880 ~ 1 920 MHz 和 2 010 ~ 2 025 MHz。为了防止频带间的相互干扰,天线工作频带设计的最佳方案应该是恰好能分别覆盖这 2 个频段,在频带间的间隔形成带阻,以减轻射频前端的滤波压力。为了达到这种效果,可通过 2 个途径解决。1) 精确控制天线频带的特性。文献[21]中利用这种方法,使用近距离的平行双 U 型槽,精确控制频带的宽度和位置,满足了近距离双频段的间隔要求。2) 在宽带覆盖的情况下利用带阻技术产生频段间的带阻。阻带的增加与通带的增加是相反的 2 种效果,但是却使用相同的技术。不同的是天线的阻抗匹配情况:在天线失配的情况下,可以产生通带的效果,即增加了一个工作频带;在天线匹配的情况下,能使天线在需要的频段失配,产生阻带。通过上述 2 种方法,终端内置天线能达到频带间抗干扰的效果,相当于在天线端增加了 1 个性能优良的滤波器,使终端能在多模工作时达到最佳的效果。

5 与移动终端应用的共形化结构设计

由于移动终端内置天线所处的空间受终端的尺寸、内部电路布局以及外壳形状等多种条件的限制,天线的外形往往需要符合终端的形状,所以产生了内置天线的共形化结构设计。共形化设计包括内置天线与射频前端的集成化设计、内置天线与终端外壳的共形化设计等。目前柔性天线技术、激光直接成型技术(LDS, laser direct structuring)等天线制作工艺的发展使内置天线的制作更加稳定、精确,成本更低。图 10 所示为利用 LDS 工艺制作的内置天线。

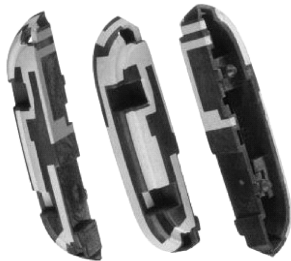


图 10 LDS 工艺制作的内置天线

内置天线的共形化设计能充分利用天线占用的内部空间,并进一步利用终端外壳扩展天线的实际使用面积,以具有更好的天线性能,但同时也将产生

天线更易受外部环境影响而失谐的问题. 采用低敏感性的结构设计, 并结合完善的测试手段可最大程度地避免该问题的产生.

6 发展趋势

由于移动终端的多种多样, 内置天线所处的环境和所能利用的空间不尽相同, 到目前为止, 终端内置天线仍然需要特殊定制, 这促使了内置天线技术的多样化, 也产生了多种内置天线的多频段和小型化技术. 然而, 传统电小天线有其频带和尺寸上的理论极限. 可以预见, 随着移动终端的快速发展, 按照前述多频段和小型化方法设计的内置天线的频带和尺寸将快速接近其理论极限. 因此, 为适应未来移动终端对内置天线的要求使其具有更多、更宽的工作频段和更小的体积, 新的天线技术, 如介质天线技术、可重构天线技术、光子晶体和异向介质天线技术、等离子天线技术等应运而生.

通过对终端内置天线多频段技术的分析发现, 单一的多频段技术已经不能满足要求, 在同一天线上有机地结合并运用多种多频段技术是实现更多频段的有效方法. 通过2个或2个以上多频段天线的结合, 能直接将多个多频段天线集成到一款天线上, 但面临的问题是集成过程中造成的馈电结构和输入阻抗的变化以及天线间耦合作用造成的频段偏移.

通过对小型化技术的分析不难发现, 大多数小型化技术同时也是多频段技术, 如开槽技术. 因此, 天线的多频段和小型化往往会同时进行. 小型化技术的发展也将倾向于多种技术的联合运用. 但由于电小天线的理论限制^[10], 如何能完全利用天线的空间是小型化技术的基本目标. 分形天线技术良好的空间填充性使其成为内置天线小型化的一个发展方向, 同时介质谐振天线技术与传统的金属天线原理不同, 能直接通过改变介质的介电常数, 快速实现小型化, 并已成功商用, 这种天线技术也将成为天线小型化技术发展的方向之一.

7 结束语

总结了移动终端内置天线多频段、小型化、带内抗干扰性能增强和共形化结构设计等技术, 介绍了利用这些技术手段设计的天线. 多频段和小型化将是移动终端内置天线发展始终面临的问题, 传统的天线技术产生出多种多样的天线形式, 新的天线技术也在迅速发展并逐步实用化, 未来的内置天线技

术将更加复杂多样.

参考文献:

- [1] Fugimoto K, James J R. Mobile antenna systems handbook[M]. Boston: Artech House, 1994.
- [2] Cho Y J, Hwang S H, Park S O. A dual-band internal antenna with a parasitic patch for mobile handsets and the consideration of the handset case and battery[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005, 4: 429-432.
- [3] Leelaratne R, Langley R. Multiband PIFA vehicle telematics antennas[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 477-485.
- [4] Shackelford A K, Lee K F, Luk K M, et al. U-slot patch antenna with shorting pin[J]. Electronics Letters, 2001, 37(12): 729-730.
- [5] Corbett R Rowell, Murch R D. A capacitively loaded PIFA for compact mobile telephone handsets[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1997, 45(5): 837-842.
- [6] Wong K L, Lee G Y, Chiou T W. A low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2003, 51(1): 121-125.
- [7] Kingsley S P, Ireland D J, O'Keefe S G, et al. In search of the perfect handset antenna[C]//LAPC 2008. Loughborough: [s. n.], 2008: 62-65.
- [8] Wong K L, Lee L C. Multiband printed monopole slot antenna for WWAN Operation in the laptop computer[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2009, 57(2): 324-330.
- [9] Huitema L, Koubeissi M, Decroze C, et al. Ultrawide-band dielectric resonator antenna for DVB-H and GSM applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 1021-1027.
- [10] Chu L J. Physical limitations of omni-directional antennas[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19: 1163-1175.
- [11] Collin R E. Small antenna[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1964, 12: 23-27.
- [12] Ramo S, Whinnery J R, Duzer T V. Field and waves in communication electronics[M]. New York: John Wiley, 1994.
- [13] Geyi W, Jamuszewski P, Qi Y. The foster reactance theorem for antennas and radiation Q[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2000, 48(3): 401-408.
- [14] Wong K L, Lin Y C, Tseng T C. Thin internal GSM/

- DCS patch antenna for a portable mobile terminal[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 238-242.
- [15] Shin Y S, Kim B N, Kwak W I, et al. GSM/DCS/IMT-2000 triple-band built-in antenna for wireless terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2004, 3(1): 104-107.
- [16] Tzortzakakis M, Langley R J. Quad-band internal mobile phone antenna[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2007, 55(7): 2097-2103.
- [17] Hsieh H W, Lee Y C, Tiong K K, et al. Design of a multiband antenna for mobile handset operations[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 200-203.
- [18] Boyle K R, Steeneken P G. A five-band reconfigurable PIFA for mobile phones[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 3300-3309.
- [19] Abdallah A S, Liu Y A, Mohammed Y E. Wide-band wide-slot microstrip antenna [C] // APRASC. Hangzhou: [s. n.], 2004: 27-30.
- [20] Abdallah A S, Mohammed Y E, Liu Yuanan. Bandwidth enhancement techniques for different shapes of single-patch single-layer microstrip patch antenna[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004, 27(2): 97-103.
- [21] 卢黎. 应用于 TD-SCDMA 终端的微带贴片天线研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [22] Di N C, Faraone A. Multiband internal antenna for mobile phones[J]. Electronics Letters, 2005, 41(9): 514-515.
- [23] Jing X, Du Z W, Gong K. A compact multiband planar antenna for mobile handsets[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, 5(1): 343-345.
- [24] Guo Y X, Chia M Y W, Chen Z N. Miniature built-in multiband antennas for mobile handsets[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2004, 52(8): 1936-1944.
- [25] Diallo A, Luxey C, Thuc P L, et al. Efficient two-port antenna system for GSM/DCS/UMTS multimode mobile phones[J]. Electronics Letters, 2007, 43(7): 369-370.
- [26] Krzysztofik W J. Modified sierpinski fractal monopole for ISM-bands handset applications[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2009, 57(3): 606-615.
- [27] Kanth R K, Singhal A K, Liljeberg P, et al. Design of multiband fractal antenna for mobile and handheld terminals[C]//AHICI. Kathmandu: [s. n.], 2009: 1-4.
- [28] Sun B, Liu Q, Xie H. Compact monopole antenna for GSM/DCS operation of mobile handsets[J]. Electronics Letters, 2003, 39(22): 1562-1563.
- [29] Kwon Y B, Moon J I, Park S O. An internal triple-band planar inverted-F antenna[J]. Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE, 2003, 2(1): 341-344.
- [30] Ren W, Liu Y A. Design of dual-band PIFA with U and meanderline-shaped slots [C]//CCEM 2006. Dalian: [s. n.], 2006: 889-892.