

文章编号: 1671-5896(2012)05-0462-08

# 基于多址技术的空分多址实现方案及应用

余明辉<sup>1,2</sup> 杨斌<sup>3</sup> 赵东风<sup>1</sup>

(1. 云南大学 信息学院, 昆明 650091; 2. 湄洲湾职业技术学院 电子工程系, 福建 莆田 351254;

3. 厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 363105)

**摘要:** 为解决信号全向发射带来的电磁污染和相互干扰问题, 提出了一种全新的多址接入方式——智能天线系统。在多址技术的基础上, 引入了空分多址系统模型, 并对空分多址系统实现方案进行了较详细而全面地分析。同时, 对空分多址方式与传统多址方式结合应用进行分析。计算机模拟结果表明了仿真与理论的一致性。

**关键词:** 多址技术; 空分多址; 基站; 多波束; 阵元; 扩频码

**中图分类号:** TN914.5      **文献标识码:** A

## Implementation and Application of Multiple-Access Technique Based on SDMA

SHE Ming-hui<sup>1,2</sup>, YANG Bin<sup>3</sup>, ZHAO Dong-feng<sup>1</sup>

(1. Institute of Information, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Department of Electronic Engineering, Meizhouwan Institute of Technology, Putian 351254, China;

3. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 363105, China)

**Abstract:** To solve the signal the whole bring to the emission of electromagnetic pollution and interfere with each other, a new multiple access smart antenna systems. On the basis of the multiple access technology, the introduction of the SDMA (space-division multiple access) system model, and space division multiple access system to carry out a more detailed and comprehensive analysis. The SDMA combined with the traditional multiple access, analyze the application. The computer simulation results show that the simulation and theoretical consistency.

**Key words:** multiple-access technique; space-division multiple access (SDMA); basestation; multiple beams; array cell; spread-frequency code

## 0 引言

智能天线系统可为每个用户提供一个窄的定向波束, 使信号在有限的方向区域内发送和接收, 充分利用了信号发射功率, 降低了信号全向发射带来的电磁污染和相互干扰, 这就相当于在空间通过物理位置的划分为用户建立双向通信<sup>[1-8]</sup>。相对传统的 FDMA (Frequency Division Multiple Access), TDMA (Time Division Multiple Access) 和 CDMA 技术, SDMA (Space-Division Multiple Access) 是一种全新的多址接入方式, 即空分多址方式<sup>[9-17]</sup>。近年来, 随着微电子技术的高速发展, 智能天线技术已经成功地应用于移动通信系统。

## 1 SDMA 模型

空分多址的基本思想是引导能量沿用户的方向传输。通常情况下, 移动用户因所处物理位置和移动

收稿日期: 2011-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60362001; 69862001)

作者简介: 余明辉 (1965—), 男, 福建莆田人, 湄洲湾职业技术学院副教授, 硕士, 主要从事随机多址通信、网络通信工程研究, (Tel) 86-13706097791 (E-mail) smh7791@126.com; 赵东风 (1957—), 男, 武汉人, 云南大学教授, 博士生导师, 主要从事随机多址和轮询多址、网络通信工程研究, (Tel) 86-13698761411 (E-mail) Zhaodf0088@126.com。

速度等因素的差别,导致信号到达方向(DOA: Direction Of Arrival)、多径结构以及多普勒频移等亦有所差别。这些差别反映了不同用户信号的空间特征,SDMA就是利用这些特征的差异,通过阵列天线技术在用户方向上形成定向波束,在同一信道上接收和发送多个用户信号而不发生相互干扰<sup>[1]</sup>。实际上它使通信资源不再局限于时域、频域或码域而拓展到了空间域。

智能天线是一种阵列天线,通过调节各阵元信号的加权幅度和相位改变阵列的方向图形状,即自适应或以预制波束幅度、指向和零点位置,使波束总是指向期望方向,而零点指向干扰方向,实现波束随着用户走,从而提高天线的增益和信干噪比(SINR: Signal to Interference Noise Ratio),节省发射功率,延长电池寿命和降低用户手机体积。智能天线的基本思想是:天线以多个高增益的动态窄波束分别跟踪多个期望信号,抑制来自窄波束以外的信号。但智能天线的波束跟踪并不意味着一定要将高增益的窄波束指向期望用户的物理方向,事实上,在随机多径信道上移动用户的物理方向是难以确定的,特别是在发射台至接收机的直射路径上存在阻挡物时,用户的物理方向并不一定是理想的波束方向。

## 2 SDMA 的实现方案

SDMA的实质是通过分割空间信道分离同一时隙或同一频道上的多个用户信号。理想的SDMA应对每个用户形成一个波束,基站跟踪用户的位置移动,采用指向性接收和发射,始终使用户处于波束的中心处,是SDMA最直观的方法<sup>[2]</sup>(见图1)。用户 $1 \sim k$ 拥有相同的频率、时隙和扩展码字,运用SDMA技术可为各个用户提供多址通信而互不干扰。理想的SDMA能对每个用户提供独立的空间信道。依据用户信号在空间传播的不同路径,由基站对多个移动用户进行波束跟踪,采用指向性接收和发射,是实现SDMA最有效的方案<sup>[3]</sup>。要实现SDMA,目前主要有固定多波束切换和自适应波束形成两种方法。

### 2.1 固定多波束切换

多波束智能天线主要采用的是波束转换技术(SBT: Switched Beam Technology),因此,也称为波束转换天线(SBA: Switched Beam Antennas)。它是在把用户区进行分区(扇区)的基础上,使天线的每个波束固定指向不同的分区,使用多个并行波束就能覆盖整个用户区,从而形成了形状基本不变的天线方向图。当用户在小区中移动时,根据测量各个波束的信号强度跟踪移动用户,并能在移动用户移动时适当地转换波束,使接收信号最强,同时较好地抑制了干扰,提高了服务质量。可以说,多波束天线是介于扇形定向天线与自适应智能天线之间的一种技术。多波束智能天线的示意图如图2所示。当MS由分区1移动到分区2时,基站将波束1自动转换为波束2。固定多波束系统的波束数目和方向是固定不变的。系统利用多个并行波束覆盖整个用户区,每个波束的指向都是固定的,波束宽度也随阵元数目的确定而确定。多波束切换算法仅有一个波束转换开关函数,该函数实现各个波束之间的切换<sup>[4]</sup>。波束切换算法和射频信号处理算法整合在智能天线中。对每个用户的通信呼叫,系统为其选择一个可以提供最佳信号的波束,然后系统持续跟踪该用户,及时切换天线波束,确保在整个连接期间满足用户需要。系统连续扫描波束的输出,选择最大的输出功率。窄带定向波束的应用,减少了对基站造成影响的干扰源的数量。当用户移动时,系统连续检测信号质量,以选择接收信号最强的波束<sup>[5]</sup>。系统框图如图3所示。由于开关波束系统对接收信号区域定位的模糊,使该系统一般只应用在基站一侧。开关波束具有很强的方向性,从接收信号功率的角度看,可以抑制当前正在使用的波束中心处之外的干扰,提高天线端的增益。但开关波束天线由于波束的指向固定,不能自适应地消除干扰,在干扰强烈的区域,其应用将受到限制<sup>[6]</sup>。因为用户信号并不一定在固定波束的中心处,当用户位于波束边缘,干扰信号

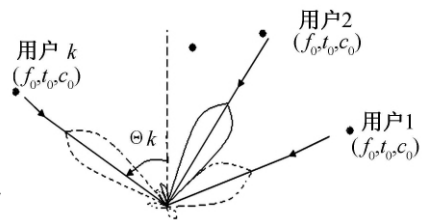


图1 SDMA为每个用户建立空间信道

Fig. 1 SDMA is every user establishment space channel

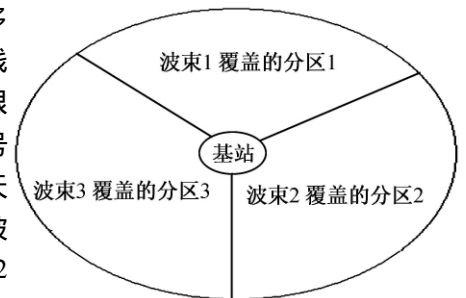


图2 多波束智能天线示意图

Fig. 2 Much beam from can antenna sketch

多波束智能天线主要采用的是波束转换技术(SBT: Switched Beam Technology),因此,也称为波束转换天线(SBA: Switched Beam Antennas)。它是在把用户区进行分区(扇区)的基础上,使天线的每个波束固定指向不同的分区,使用多个并行波束就能覆盖整个用户区,从而形成了形状基本不变的天线方向图。当用户在小区中移动时,根据测量各个波束的信号强度跟踪移动用户,并能在移动用户移动时适当地转换波束,使接收信号最强,同时较好地抑制了干扰,提高了服务质量。可以说,多波束天线是介于扇形定向天线与自适应智能天线之间的一种技术。多波束智能天线的示意图如图2所示。当MS由分区1移动到分区2时,基站将波束1自动转换为波束2。固定多波束系统的波束数目和方向是固定不变的。系统利用多个并行波束覆盖整个用户区,每个波束的指向都是固定的,波束宽度也随阵元数目的确定而确定。多波束切换算法仅有一个波束转换开关函数,该函数实现各个波束之间的切换<sup>[4]</sup>。波束切换算法和射频信号处理算法整合在智能天线中。对每个用户的通信呼叫,系统为其选择一个可以提供最佳信号的波束,然后系统持续跟踪该用户,及时切换天线波束,确保在整个连接期间满足用户需要。系统连续扫描波束的输出,选择最大的输出功率。窄带定向波束的应用,减少了对基站造成影响的干扰源的数量。当用户移动时,系统连续检测信号质量,以选择接收信号最强的波束<sup>[5]</sup>。系统框图如图3所示。由于开关波束系统对接收信号区域定位的模糊,使该系统一般只应用在基站一侧。开关波束具有很强的方向性,从接收信号功率的角度看,可以抑制当前正在使用的波束中心处之外的干扰,提高天线端的增益。但开关波束天线由于波束的指向固定,不能自适应地消除干扰,在干扰强烈的区域,其应用将受到限制<sup>[6]</sup>。因为用户信号并不一定在固定波束的中心处,当用户位于波束边缘,干扰信号

位于波束中央时接收效果最差,所以固定多波束系统不能实现信号最佳接收。但是,固定多波束切换系统具有结构简单、无需要判定用户信号到达方向的优点,而且易于实现<sup>[7]</sup>。在固定多波束切换系统中,多波束的形成有很多方法:特定波束形成算法和直接加主瓣偏移形成算法、FFT形成算法和联合形成多波束算法等。多波束天线不能实现信号的最佳接收,这种多波束智能天线主要在模拟移动通信系统中应用。

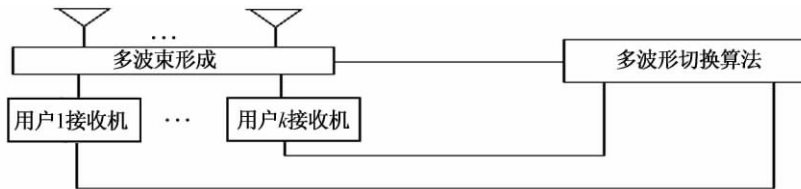


图3 固定多波束形成系统框图

Fig.3 Fixes velocity of wave to form systematic block diagram

## 2.2 自适应波束系统形成

自适应智能天线原名叫自适应天线阵列(AAA: Adaptive Antenna Array),是一种安装在基站现场的双向(既可接收又可发送)天线(见图4)。基于自适应天线原理,采用现代自适应空间数字处理技术(Adaptive Spatial Digital Processing Technology),通过选择合适的自适应算法,利用天线阵的波束赋形技术动态地形成多个独立的高增益窄波束,使天线主波束对准用户信号到达的方向,同时旁瓣或零陷对准干扰信号到达的方向,以增强有用信号、减少甚至抵消干扰信号,提高接收信号的载干比,同时增加系统的容量和频谱效率。从SDMA技术角度来说,它是利用信号在传输方向上的差别,将同频率或同时隙、同码道的信号区分开来,从而最大限度地利用有限的信道资源,增加信道的容量和提高频谱的效率<sup>[8]</sup>。由自适应智能天线阵列、波束形成网络和波束形成算法3部分组成,其结构如图4所示。

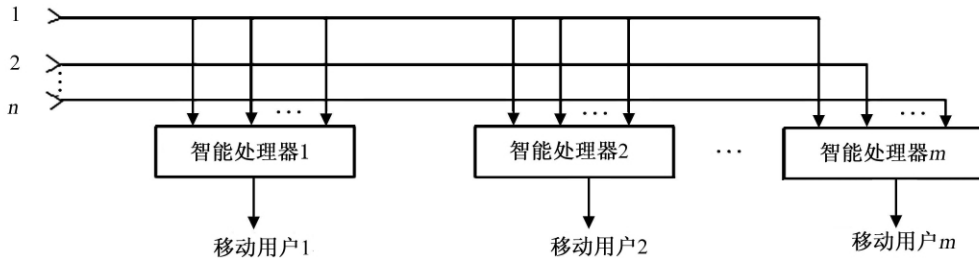


图4 CDMA智能天线结构图

Fig.4 CDMA intelligent antenna structure

在自适应天线阵列中,由于每根天线的位置都不完全相同,因此它们所接收到信号的幅度、相位也不同,这样同时产生了多个有方向性的波束。对这些波束进行加权处理后分配给不同的用户,保证了每个用户能得到最大的增益和最小的噪声干扰。与固定多波束切换方式不同,自适应波束形成方式不是选择既定的波束,而是根据期望信号的先验知识,在期望信号的方向上自适应地形成一个波束;然后持续跟踪移动台的位置变动,动态地改变波束的方向和形状<sup>[9]</sup>。这种方式不但可以解决固定多波束切换方式中移动台处于波束的边缘时性能下降的问题,还可以根据业务需求改变小区的大小和形状,动态地形成小区。关于自适应波束形成的算法较多,基于各种约束准则(如最小均方准则、最小二乘准则、最大信干比准则)算法有:LMS(Least Mean Square)算法、RLS算法、SMI算法、功率倒置算法和约束算法等<sup>[10]</sup>;基于信号恒模特征算法有:恒模算法、最小二乘恒模算法和多目标最小二乘恒模算法等。此外,还有基于信号空间的方法等。自适应波束形成系统为了实现其改善系统性能的目标,必须在动态环境下对许多时变参数进行估计和优化,并且这些系统参数的更新耗费的时间也是必须考虑的因素<sup>[11]</sup>。例如,系统要求实时更新处于快速移动中的移动台的位置信息,而响应时间却受到方向角的估计、跟踪算法以及收敛至满足水平波束的形成算法所需时间的限制。自适应波束形成系统框图如图5所示。尽管可以通过并行算法实现增强信号处理能力,但同时也增加了系统的开销,因此,在移动环境中采用自适应波束形成还有一定的困难<sup>[12]</sup>。相

比较而言,固定多波束切换方式的实现要容易一些。与多波束智能天线相比,自适应智能天线具有无限个可随时间调整的方向图(不同的天线波束构成方式即形成一个不同的方向图),可以有效地跟踪、锁定各种类型的信号,得到最大的信噪比,实现信号的最佳接收。

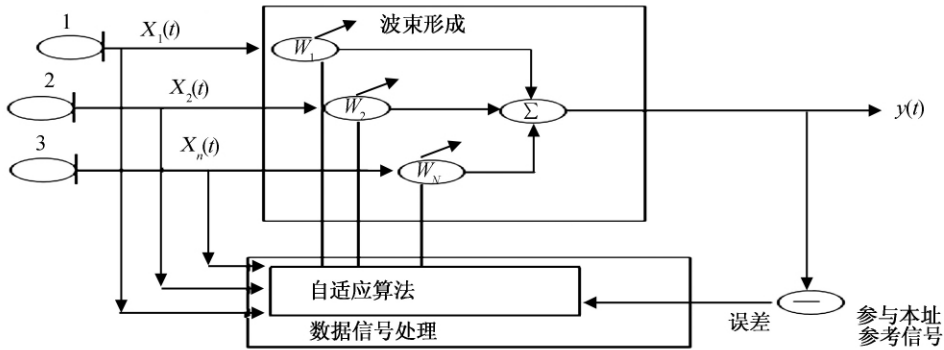


图 5 自适应波束形成系统框图

Fig. 5 From meet beam form systematic block diagram

### 3 SDMA 与传统多址方式的结合应用

#### 3.1 SDMA 在 CDMA 系统中的应用

CDMA 蜂窝系统的结构与 FDMA/TDMA 系统有本质的不同。在 CDMA 系统中,所有的频率和时间是每个用户都在同时享受的公共资源而非单个用户所独有<sup>[13]</sup>。无线信道是用基本不同的扩频码字定义的,理论上的系统容量也取决于扩频码的数量,但时间的系统容量(即实际可分配使用的信道数目)将受限于系统的自干扰,即不同用户间由于扩频码并非理想正交而产生的多址干扰 MAI(Multiple Access Interference),所以 CDMA 系统是个干扰受限系统。因此,只要有效地降低多址干扰,就可以增加分配的信道数目,从而增大系统的容量。由于 CDMA 系统中的每个用户都是其他用户的干扰源,所以,当在 CDMA 系统中运用智能天线实现 SDMA 后,进入 SDMA 所定义的空间信道内的用户数目仍相对较多,一般多于智能天线的阵元数目<sup>[14]</sup>。此时,智能天线所形成的辐射方向图不在对多址干扰信号“陷零”完全消除,而是仅以最大增益主瓣对准期望用户方向,同时,允许一部分多址干扰以较低的增益进入基站接收机(见图 6)。相比 FDMA/TDMA 系统,这时的 SDMA 处理技术复杂度有所降低<sup>[15]</sup>。CDMA 系统采用 SDMA 技术,可进行话务均衡,将高话务扇区的部分话务量转移到容量资源未充分利用的扇区;通过智能天线灵活的辐射模式和定向性,可进行软/硬切换控制;智能天线的空间域滤波可改善远近效应,简化功率控制,降低系统成本,也可减少多址干扰,提高系统性能。

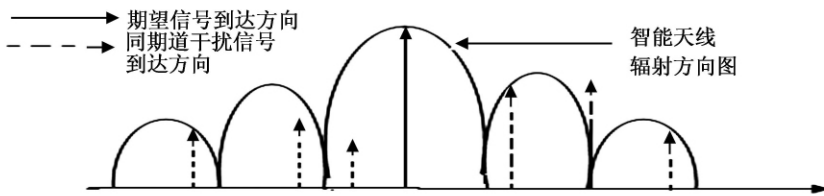


图 6 CDMA 系统中应用 SDMA 处理 CCI

Fig. 6 Applies SDMA in CDMA system to handle CCI

SDMA 可以实现频率的重复使用,充分利用了频率资源,同时还可以和其他多址方式相互兼容。从而实现组合的多址技术,如空分码分多址(SD-CDMA)。SDMA 不受限于任何调制方式和空中接口协议<sup>[16]</sup>。它与 FDMA 结合,允许多用户享用同一频率信道;与 TDMA 结合,允许多用户享用同一时隙信道;与 CDMA 结合,通过空间信道的分割,可抑制多址干扰 MAI,从而提高系统容量和链路通信质量。SDMA 系统能在同一条普通信道上创建大量的频分、时分或码分双向空间信道,每条信道都可以完全获得整个阵列的增益和抗干扰功能。

### 3.2 CDMA 系统的功率控制和波束的形成

在 CDMA 系统中,用户共用一个宽带信号,通过一组相互不完全正交的伪随机码相区别。在这样的系统中,用户受到的主要干扰是远近效应,即当基站与一个较远处的移动台进行通信时,它会受到较近移动台发射信号的影响。如果每个移动台的发射功率都相同,则远处移动台传到基站的信号就较弱,容易受附近移动台相对较强信号的干扰。因此在 CDMA 系统中,为了保证系统的整体通信质量,必须进行功率控制。

通常的功率控制流程图如图 7 所示,通过迭代算法动态实现。首先从一个任意的初始功率开始,然后测量接收到的干扰,调整信号功率,使载波干扰比(CIR: Carrier to Interference Ratio)大于门限,经过几次迭代后,功率的变化小于预先给定的值时,即可停止。

在通常 CDMA 功率控制的基础上再加入智能天线技术,可以得到更强的特性。功率控制与波束形成相结合的控制流程图如图 8 所示。

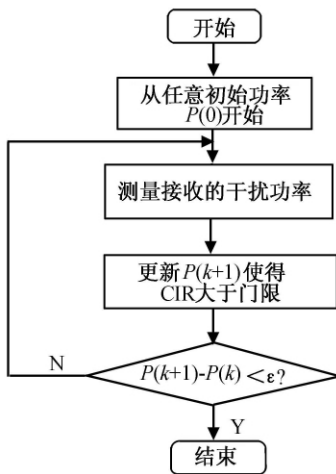


图 7 CDMA 系统功率控制流程图

Fig. 7 CDMA systematic power control flow chart

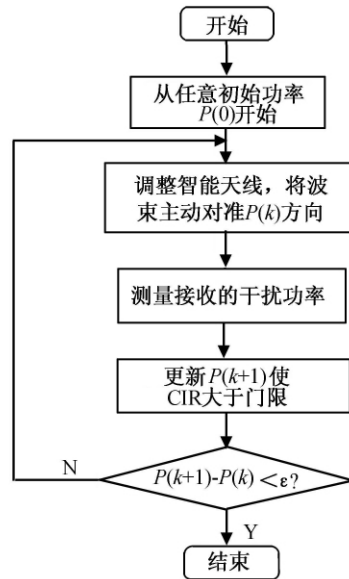


图 8 功率控制与波束形成相结合的控制流程图

Fig. 8 Power control and beam the control flow chart that forms combination

同样是用迭代的方法调整信号的发射功率,但在每次迭代之前都先进行波束形成运算,将方向图的主瓣指向信号方向,得到一个最优的信号功率。因此,将波束形成与功率控制相结合,可以更有效地进行 CDMA 系统的功率控制,提高通信质量。也可以在保持信噪比不变的情况下,提高系统的用户容量。

上述迭代算法收敛于一个最优波束形成权矢量和功率值。文献 [16] 的仿真结果表明,在达到相同信噪比的情况下,在基站利用四单元智能天线的波束形成和功率控制相结合的算法,比使用普通功率控制算法,其覆盖范围和用户数量都有明显提高,由此也可以说明,在 CDMA 网络中使用智能天线技术可以大大改善通信质量,提高系统容量。

在移动通信组网中遇到的一对矛盾就是通信流量和呼损率。在有限的物理信道数量下,用户容量越大,通信流量就越大,然而用户发起呼叫受到拒绝的概率就越大,越区切换时由于信道不够而造成的切换失败或导致通话中断的概率也就越大。利用智能天线分集接收的能力,在有限的物理信道个数基础上,可以成倍地扩充信道个数,也就成倍的提高了系统的用户容量,同时可以保证通信质量不受影响。

采用智能天线进行信道分配时需要衡量通话质量,这是由于同一个物理信道中的  $K$  个波束必须在不同的空间方向上。如果在某个方向上已经有用户在通话,同时又有有一个用户在相同的方向上发起呼叫或切换,这时不管如何调节自适应权矢量,两个用户的方向图主瓣都是重叠的,造成两个用户相互干扰,这就

必须为当前的用户另行分配信道<sup>[17]</sup>。所以,采用智能天线增大的  $K$  倍信道个数必须根据用户的方向进行

分配。智能天线的另一个优点是可以动态地跟踪用户。由于智能天线是自适应地调节主瓣使其对准用户,因此,当用户移动时,方向图的主瓣可以始终跟踪用户,同时系统可以自动检测通话质量,即计算误差值。当误差大于规定门限时,说明通话质量低于可以接受的程度,这可能是由于两个用户移动到同一方向上,方向图主瓣重叠造成,或是用户移动的方向刚好在另一用户信号的某个强多径干扰的方向,造成主板接收的信号受到很强的干扰,无法抑制。因此,当误差大于门限时,系统可以为用户重新分配信道,同时保证用户的通话不被中断。

### 3 计算机仿真实验与结果分析

选取阵列模型,设置信道特征。选择中心频率为参考频率,利用窄带智能天线的 LMS 算法求出该频率的权值以及参考波束。用波束综合算法求出其他频带的权值。

设均匀线列阵由 5 个相同的阵元组成,阵元间距为接收信号最高频率对应波长的一半。信号的归一化频率范围为 0.8~1.2。期望信号位于 0°方向,多径干扰位于 25°和 45°方向,信道噪声取为随机白噪声。对模型进行初始化,设信号响应向量

$$v(f, \theta) = [a_1(f, \theta) \ a_2(f, \theta) \ 1 \ a_4(f, \theta) \ a_5(f, \theta)]^T \tag{1}$$

设接收信号

$$r(t) = a_0x(t)v(f, \theta_0) + a_1x(t-1)v(f, \theta_1) + a_2x(t-2)v(f, \theta_2) + n(t) \tag{2}$$

设  $\theta_0 = 0^\circ, \theta_1 = 25^\circ, \theta_2 = 45^\circ, a_0 = 0.49 + j0.85, a_1 = 0.91 + j0.53, a_2 = 0.22 + j0.13$

将频带划分为 5 个子频带并且将中心频率归一化,仿真得到频带为 0.8, 1.0, 1.2 的波束图,将波束图最大方向归一化,仿真结果如图 9~图 11 所示。

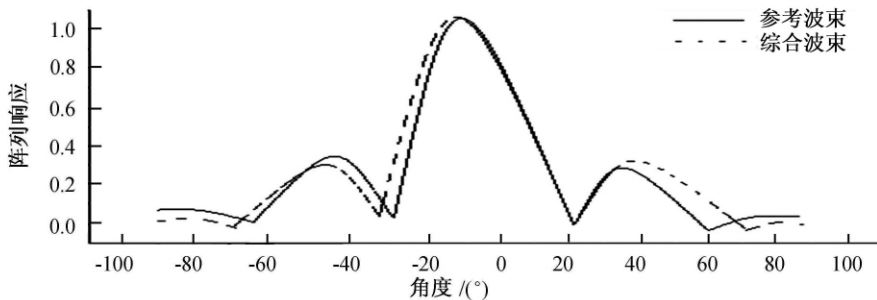


图 9 相对频率 0.8: 1

Fig.9 Relative frequency 0.8: 1

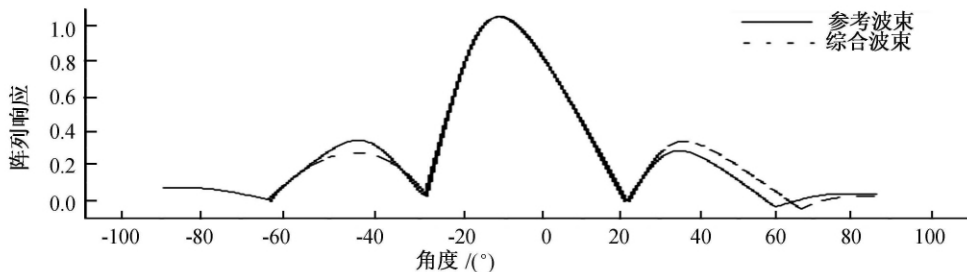


图 10 相对频率 1.0: 1

Fig.10 Relative frequency 1.0: 1

图 11 是迭代 9 次后的结果,实线为中心频率波束图,虚线为各子频带波束图。由仿真可见,主瓣范围内获得了良好的频率不变性,同时,旁瓣得到了较好的抑制。自适应阵列天线因其能消除高密度信号环境下的多径和信道间干扰,在无线通信领域得到了应用。

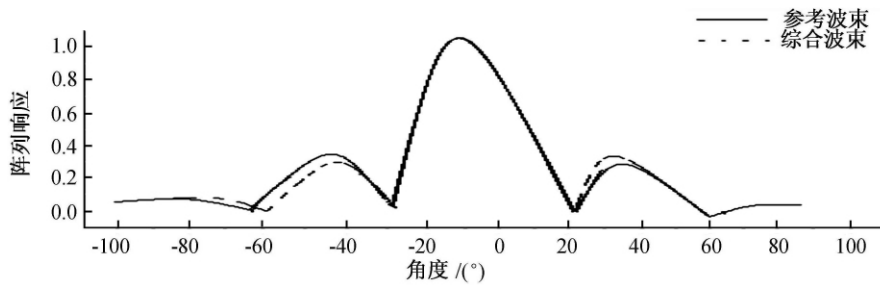


图 11 相对频率 1.2: 1

Fig. 11 Relative frequency 1.2: 1

## 4 结 语

智能天线系统,天线以多个高增益窄波束动态地跟踪多个期望用户:在接收模式下,来自窄波束之外的信号被抑制;在发射模式下,能使期望用户接收的信号功率最大。同时使窄波束照射范围以外的非期望用户受到的干扰最小。智能天线是利用用户空间位置的不同区分不同用户的。不同于传统的 FDMA、TD-MA 或 CDMA 技术,智能天线引入第 4 种多址方式,即 SDMA,即基于自适应天线阵列技术,基站能够根据获得的来自不同终端的信号特征,即使它们使用的是相同的载频和时隙,也能区分在不同空间位置上的终端。采用该技术后,通常能使基站增加一个额外的信道,从而提高频谱利用效率,增加基站的信号处理能力。尤其是自适应阵列无线等技术的应用,空分多址技术将会有更广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] LEONARD K, FUUAD A TOBAGZ. Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple-Access Modem and their Throughput-Delay Characteristics [J]. IEEE Trans Commun, 1975, 23(12): 1400-1416.
- [2] ROYER E M. A Review of Current Routing Protocol for Ad Hoc Mobile Wireless Networks [J]. IEEE Personal Communications Magazine, 1999, 6(2): 46-55.
- [3] STEPHAN E. IPPM Metrics Registry [J]. Network Working Group Internet Draft, 2003, 2(4): 45-49.
- [4] NICOPOLITIDIS P, PAPANIMITRIOU G I, OBAIDAT M S. Carrier-Sense-Assisted Adaptive Learning MAC Protocols for Distributed Wireless LANs [J]. International Journal of Communication Systems, 2005, 18(7): 657-669.
- [5] HAN Y S, JING DENG, HAAS Z J. Analyzing Multi-Channel Medium Access Control Schemes with ALOHA Reservation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(8): 2143-2152.
- [6] PETERSON R L. 扩频通信导论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- PETERSON R L. Expand Frequently Communication Introduction [M]. Beijing: Electronic Industrial Press, 2006.
- [7] PROAKIS J G, SALEHI. 电子系统工程 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- PROAKIS J G, SALEHI. Electronic Systematic Project [M]. 2nd ed. Beijing: Electronic Industrial Press, 2002.
- [8] 余明辉, 赵东风. 基于随机多址协议的系统吞吐量分析 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28(1): 13-19.
- SHE Ming-hui, ZHAO Dong-feng. Based on Radom Much Address the Systematic Analysis of Handling Capacity of Agreement [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2010, 28(1): 13-19.
- [9] 包闻亮, 鲍风. 信号和通信系统 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
- BAO Wen-liang, BAO Feng. Signal and Communication System [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1993.
- [10] 冯玉珉. 通信系统原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- FENG Yu-min. Communicate Systematic Principle [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [11] 余明辉, 林琳, 赵东风. 自适应多通道二维概率型时隙式随机多址无线通信网络协议分析 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 232-237.
- SHE Ming-hui, LIN Lin, ZHAO Dong-feng. Since Meeting the two Passageway Dimension Probability Type of Time Slot Radom Much Address Wireless Communication Network Agreement Analysis [J]. Journal of Yunnan University: Natural Science, 2009, 31(3): 232-237.

- [12]余明辉,黄毛毛,赵东风,等.一种新的WSN随机多址MAC协议设计与性能分析[J].云南大学学报:自然科学版,2010,32(1):18-25.  
SHE Ming-hui, HUANG Mao-mao, ZHAO Dong-feng, et al. A Kind of New WSN Radom Much Address MAC Agreement Design and Performance Analysis [J]. Journal of Yunnan University: Natural Science 2010, 32(1): 18-25.
- [13]佟学俭,罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.  
TONG Xue-jian, LUO Tao. The OFDM Technical Principle and Application of Mobile Communication [M]. Beijing: The People's Press of Post and Telecommunications, 2003.
- [14]余明辉,赵东风.基于窗口式流量和拥塞控制的分析[J].贵州大学学报:自然科学版,2009,26(5):66-69.  
SHE Ming-hui, ZHAO Dong-feng. Based on Window Type Rate of Flow with the Analysis of Jam Control [J]. Journal of Guizhou University: Natural Science 2009, 26(5): 66-69.
- [15]梅文华.跳频通信[M].北京:国防工业出版社,2005.  
MEI Wen-hua. Jump Frequency Communication [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [16]余明辉,赵东风.基于流量和拥塞控制最佳速率调整算法的研究[J].贵州大学学报:自然科学版,2010,27(2):62-65.  
SHE Ming-hui, ZHAO Dong-feng. Based on Rate of Flow and Jam Control the Research of Best Speed Adjustment Algorithm [J]. Journal of Guizhou University: Natural Science 2010, 27(2): 62-65.
- [17]余明辉,杨斌,赵东风.轮询多址通信系统的门限服务分析方法[J].吉林大学学报:信息科学版,2011,29(1):7-13.  
SHE Ming-hui, YANG Bin, ZHAO Dong-feng. Inquire Address the Door Service Analysis Method of Communication System [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition 2011, 29(1): 7-13.

(责任编辑:刘东亮)