

文章编号 1005-0388(2007)05-0815-07

用于智能天线系统的多小区空时 联合处理算法*

宋晓勤^{1,2} 胡爱群¹ 薛 强² 赵苏鉴²

(1. 东南大学信息科学与工程学院, xiaoqin.song@sohu.com, 江苏 南京 210096;

2. 鼎桥通信技术有限公司, 北京 100102)

摘 要 TD-SCDMA 系统同频组网时, 邻区用户同样会产生多址接入干扰, 而传统的联合检测无法消除。为了抑制邻区干扰, 对上行链路接收端提出了一种将联合检测扩展到多个小区并与智能天线相结合的多小区空时联合处理算法。该算法根据对邻区用户信道估计的结果选择其中的强干扰用户, 并将邻区强干扰用户和本小区用户的复合信道冲激响应同时纳入空时联合处理的系统矩阵。仿真结果表明, 在室内-室外和高速车载信道模型下, 采用多小区空时联合处理算法的接收机解调性能有 3~4.8 dB 的提升。此外, 讨论了邻区相关信息的获取、邻区强干扰用户的选择和运算复杂度等具体实现时需考虑的问题。多小区空时联合处理算法可有效消除邻区强干扰用户的干扰, 从而大幅提高了同频组网时系统的性能。

关键词 智能天线, 联合检测, 多小区空时联合处理, 小区间干扰, TD-SCDMA

中图分类号 TN828.6, TN76

文献标识码 A

Multi-cell space-time processing algorithm for smart antenna system

SONG Xiao-qin^{1,2} HU Ai-qun¹ XUE Qiang² ZHAO Su-jian²

(1. Southeast University, xiaoqin.song@sohu.com,

Nanjing Jiangsu 210096, China; 2. TD-Tech Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract In an intra-frequency TD-SCDMA network, the signals from adjacent cells also produce the multiple access interference (MAI), which can not be eliminated by the conventional joint detection. Multi-cell space-time processing algorithm was proposed for the uplink receiver to remove both intra-cell and inter-cell MAI, by expanding joint detection algorithm to adjacent cells and combining with smart antenna technology. The strong interfering users of adjacent cells were selected based on the channel estimation results of adjacent cells. Instead of handling the signals from adjacent cells as white noise, the proposed algorithm included the strong interfering users of adjacent cells into the space-time processing matrix. Simulations under outdoor-to-indoor A (OTIA) and vehicular A (VEHA) channel models showed 3~4.8 dB of performance gain at the receiver by exploiting the multi-cell space-time processing algorithm. In addition, some problems related to the implementation were considered, such as the acquirement of necessary information of adjacent cells, the criteria in selecting the strong interfering adjacent cell us-

ers, and the computational complexity. By eliminating effectively the interference from strong interfering users in adjacent cells, the multi-cell space-time processing algorithm can significantly improve the performance of the intra-frequency TD-SCDMA system.

Key words smart antenna, joint detection, multi-cell space-time processing, inter-cell interference, TD-SCDMA

1 引 言

目前,以 GSM 和 IS-95CDMA 为代表的第二代蜂窝移动通信系统已遍布全球。然而,以窄带技术为核心的第二代移动通信系统已无法完全满足移动用户对高速数据业务的需求。因此,以宽带、多媒体业务为核心的第三代移动通信系统就应运而生。

TD-SCDMA 是中国标准化组织向国际电联 (ITU) 提交的第三代移动通信标准。经过艰苦的努力,于 1999 年 11 月被 ITU 所接受,写入无线接口技术规范的建议中,并最终作为 UTRA-TDD 的低码片速率 (LCR) 部分写入国际标准,成为与 WCDMA、CDMA2000 标准同列的第三代移动通信的三大标准之一。经过长期的发展和演进,目前 TD-SCDMA 系统已进入现场实验环节。

TD-SCDMA 系统采用的关键技术包括智能天线和联合检测。由于 TD-SCDMA 采用分时隙的物理层结构,同频段、同时隙的用户数相对较少,联合检测的运算复杂度比其他未分时隙 CDMA 系统明显下降,非常有利于在实际系统中应用。在现有的 TD-SCDMA 系统的上行链路中,采用联合检测和智能天线相结合的空时联合处理技术^[1]。联合检测主要是用于消除小区内其他用户的干扰,而智能天线可以用于消除小区间的干扰和抑制小区内不同方向用户的干扰^[2]。

对于本小区和邻小区采用相同载波频率的同频组网方式,靠近本小区边缘的邻小区用户在发射信号时会产生较强的干扰。传统的单小区空时联合处理方法将这部分干扰作为白噪声来处理。新提出的多小区空时联合处理算法,将本小区和邻小区强干扰用户同时纳入空时联合处理的系统矩阵进行考虑,可进一步消除邻近小区强干扰用户的干扰,提高系统性能。

2 系统模型

TD-SCDMA 物理信道^[3,4]可分为三层结构:系统帧编号、无线帧和时隙。每个无线帧又可分为 2

个 5 ms 的子帧。一个子帧包括 7 个周期为 $675\mu\text{s}$ 的主时隙 (TS) 和 3 个特殊时隙: DwPTS (下行导频), GP (保护带) 以及 UpPTS (上行导频)。其中第一个切换点是固定的,第二个切换点的位置可以根据业务对上行和下行数据流量的要求而变化。

主时隙的脉冲结构包括两个 352chips 的数据域、一个 144chips 的中间训练序列 (midamble 码) 和一个 16chips 的保护带。根据扩频因子不同,每个时隙最多可用 16 个扩频码。一个无线信道资源单位 (RU) 定义为在一个主时隙内的一个扩频码。

假设第 k 个用户的符号数据长度为 N , 数据符号序列 $\mathbf{d}^{(k)}$ 可表示为

$$\mathbf{d}^{(k)} = (d_1^{(k)}, d_2^{(k)}, \dots, d_N^{(k)})^T \quad (1)$$

采用扩频因子为 Q 的扩频码 $\mathbf{c}^{(k)}$ 进行扩频,

$$\mathbf{c}^{(k)} = (c_1^{(k)}, c_2^{(k)}, \dots, c_Q^{(k)})^T \quad (2)$$

对于接收天线 m , 第 k 个用户的信道冲激响应

$$\mathbf{h}^{(k,m)} = (h_1^{(k,m)}, h_2^{(k,m)}, \dots, h_W^{(k,m)})^T \quad (3)$$

其中 W 为冲激响应长度。

考虑了扩频码的复合信道冲激响应 $\mathbf{b}^{(k,m)}$ 可以表示为 $\mathbf{h}^{(k,m)}$ 与 $\mathbf{c}^{(k)}$ 的卷积

$$\mathbf{b}^{(k,m)} = (b_1^{(k,m)}, b_2^{(k,m)}, \dots, b_{Q+N-1}^{(k,m)})^T = \mathbf{h}^{(k,m)} * \mathbf{c}^{(k)} \quad (4)$$

则天线 m 的接收信号可表示为

$$\mathbf{e}^{(m)} = \sum_{k=1}^{K_0} \mathbf{B}_0^{(k,m)} \mathbf{d}^{(k)} + \sum_{k=K_0+1}^{K_0+K_1} \mathbf{B}_0^{(k,m)} \mathbf{d}^{(k)} + \mathbf{n}^{(m)} \quad (5)$$

其中, K_0 为本小区接入用户 RU 数, K_1 为邻小区强干扰用户 RU 数。

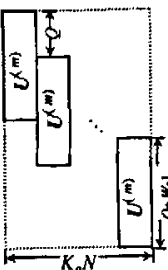
$$\mathbf{B}_0^{(k,m)} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(k,m)} & & \\ & \mathbf{h}^{(k,m)} & \\ & & \ddots \\ & & & \mathbf{h}^{(k,m)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(5) 式中第一项为本小区用户所产生的信号, 第二项为邻小区强干扰用户所产生的信号, 第三项为其它干扰和噪声。

3 多小区空时联合处理算法原理

传统的单小区空时联合处理,仅对本小区的用户进行联合检测。对于天线 m ,联合检测的系统矩阵为

$$B^{(m)} = \begin{bmatrix} U^{(m)} \\ U^{(m)} \\ \vdots \\ U^{(m)} \end{bmatrix} \quad (7)$$



其中, $U^{(m)}$ 为估计出的本小区 K_u 个接入用户 RU 的复合信道冲激响应 $\hat{h}^{(k,m)}$ 组成的矩阵

$$U^{(m)} = \begin{bmatrix} \hat{h}^{(1,m)} & \cdots & \hat{h}^{(K_u,m)} \end{bmatrix} \quad (8)$$



本节主要介绍多小区空时联合处理算法,并说明其与传统的单小区空时联合处理的异同。与传统的单小区空时联合处理相比,多小区空时联合处理的主要特点在于:

- 根据智能天线中不同接收单元之间信号的相关性,对信号进行幅度和相位的调整;
- 在进行信道估计时,除了估计本小区活动用户的信道冲激响应,还需要估计邻小区强干扰用户的信道冲激响应;
- 在构造多小区空时联合处理的系统矩阵 A 时,需要将与邻小区强干扰用户有关的复合信道冲激响应(考虑了扩频码后的信道冲激响应)分量也纳入系统矩阵;
- 采用多小区空时联合处理所得到的估测数据,不仅包括本小区活动用户的数据,同时还包括邻小区强干扰用户的数据。

3.1 智能天线的结构

典型的智能天线系统^[5]是由 M 个天线单元和 M 个相干射频收发信单元组成的天线阵。其基带 DSP 处理单元利用空间信息动态地跟踪用户。在上行链路中,考虑到达不同天线单元信号的幅度和相位的差别,将多维信号优化合并。对于下行链路,利用上行接收信号产生波束赋形因子,减少对其他用户的干扰,因而提升了系统的性能。

智能天线通常采用圆形阵或线形阵^[6]。图 1 所

示为采用具有 8 个天线单元的等间距线阵,相邻两个天线单元之间的间隔为 $\lambda/2$ 。其中, λ 为信号的波长。

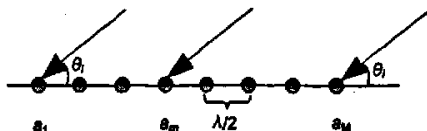


图 1 等间距线阵的结构

由于智能天线的各天线单元的位置不同,所接收信号的相位也不同。我们选取天线元素 a_1 为参考点,其位置坐标为 $(0,0)$,第 m 个天线单元的位置为 $(\lambda(m-1)/2,0)$,假设一平面波以 θ_i 的角度到达天线阵,第 m 个天线单元与参考点之间的距离差可表示为

$$D_m = (\lambda(m-1)/2) \cos \theta_i \quad (9)$$

第 m 个天线单元与参考点之间的相位差 φ_m 为

$$\varphi_m = 2\pi D_m / \lambda \quad (10)$$

对于不同的天线单元,其接收信号的幅度和相位是不同的。这些信息将被送到基带数字信号处理器,并用波束成形算法加以合并。这就是通常所说的上行波束成形,在实现中一般是和联合检测算法结合在一起进行,因而称为空时联合处理。下行信号波束成形^[7]不作讨论。

3.2 信道估计

在 TD-SCDMA 系统中,采用中间训练序列对信道冲激响应进行估计。由于同一个小区不同用户的 midamble 码是由某个基本的 midamble 序列 M_p 经过循环移位得到的,信道估计矩阵满足循环移位特性。因此,传统的单小区空时联合处理可采用 Steiner 估计器^[8],利用离散 Fourier 变换(DFT)和离散 Fourier 反变换(IDFT)来降低运算复杂度。天线 m 上信道冲激响应估计值为

$$\hat{h}_0^{(m)} = \text{IDFT}(\Lambda_0^{-1} \cdot \text{DFT}(e_{md}^{(m)})) \quad (11)$$

其中, $e_{md}^{(m)}$ 为天线 m 所接收到的用于信道估计的中间训练序列,长度为 L 。 Λ_0 是对角阵,第 l 个对角线元素 λ_{0l} 为基本 midamble 序列 M_p 经过 DFT 后的第 l 个分量

$$\lambda_{0l} = (\text{DFT}(M_p))_l \quad l=1 \cdots L \quad (12)$$

在多小区空时联合处理系统中,由于要对邻近小区的用户进行检测,所以不仅要对本小区用户的信道冲激响应进行估计,还要估计出邻近小区强干

扰用户的信道冲激响应。对于邻近小区强干扰用户进行信道估计时,只要将 Steiner 估计器中的基本 midamble 序列转换成相应邻小区所对应的基本 midamble 序列,就能得到相应于天线 m ,该小区强干扰用户的信道冲激响应。

将本小区活动用户和邻近小区强干扰用户的信道冲激响应 $\hat{h}^{(k,m)}$ 依次排列

$$\hat{h}^{(m)} = [\hat{h}^{(1,m)T}, \dots, \hat{h}^{(K_0,m)T}, \dots, \hat{h}^{(K_0+K_1,m)T}]^T \quad (13)$$

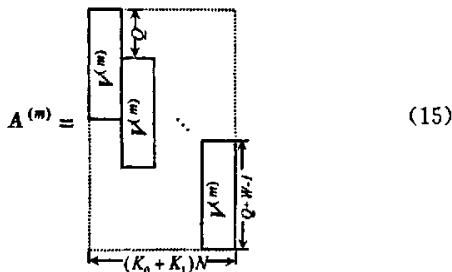
$k=1 \dots K_0$ 为本小区接入用户的信道冲激响应, $k=(K_0+1) \dots (K_0+K_1)$ 为邻小区强干扰用户的信道冲激响应。

3.3 构造系统矩阵

传统的单小区空时联合处理仅考虑本小区用户的影响,(5)式中第二项的邻小区用户信号和第三项的其它干扰和噪声,均作为白噪声处理。在构造系统矩阵时,也仅考虑本小区活动用户的复合信道冲激响应。而多小区空时联合处理将邻小区强干扰用户所产生的信号,同样作为可以检测的用户信号。因此,需要将与邻小区强干扰用户有关的复合信道冲激响应分量也纳入系统矩阵。多小区空时联合处理的系统矩阵 A 定义为

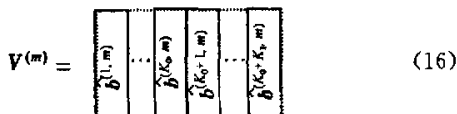
$$A = (A^{(1)T}, A^{(2)T}, \dots, A^{(M)T})^T \quad (14)$$

定义 Q 为扩频因子, W 为冲激响应的长度, M 为总天线数。 $A^{(m)}$ 可表示为



$$A^{(m)} = \begin{bmatrix} V^{(m)} & & \\ & \ddots & \\ & & V^{(m)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $V^{(m)}$ 为本小区和邻小区强干扰用户的复合信道冲激响应 $\hat{b}^{(k,m)}$ 所组成的矩阵



$$V^{(m)} = [\hat{b}^{(1,m)}, \dots, \hat{b}^{(K_0,m)}, \dots, \hat{b}^{(K_0+K_1,m)}] \quad (16)$$

式中 $\hat{b}^{(K_0+1,m)}, \dots, \hat{b}^{(K_0+K_1,m)}$ 部分为考虑了邻小区干扰后所增加的项,这是与传统的单小区空时联合处理系统矩阵的主要区别。 $\hat{b}_i^{(k,m)}$ 为考虑了扩频码后用户 k 在天线 m 上的复合信道冲激响应 $\hat{b}^{(k,m)}$ 的一个分量

$$\begin{aligned} \hat{b}_i^{(k,m)} &= (\hat{b}_1^{(k,m)}, \hat{b}_2^{(k,m)}, \dots, \hat{b}_{Q+W-1}^{(k,m)})^T \\ &= \hat{h}^{(k,m)} * c^{(k)} \end{aligned} \quad (17)$$

3.4 用户数据的检测

联合检测算法^[9-12]采用均方误差最小块线性均衡(MMSE-BLE)的方法。待测信号的估计值 $\hat{d}$ 可表示为

$$\hat{d} = (A^H R_n^{-1} A + R_d^{-1})^{-1} A^H R_n^{-1} e \quad (18)$$

e 为 M 个天线上接收信号经过智能天线的上行波束赋形算法后得到的数据部分,

$$e = (e^{(1)T}, e^{(2)T}, \dots, e^{(M)T})^T \quad (19)$$

其中, $e^{(m)} = (e_1, e_2, \dots, e_{NQ+W-1})^T$ (20)

$\hat{d}$ 为 (K_0+K_1) 个用户的估测数据

$$\hat{d} = (\hat{d}^{(1)T}, \hat{d}^{(2)T}, \dots, \hat{d}^{(N)T})^T \quad (21)$$

N 为每个用户的数据长度。 $\hat{d}^{(i)}$ 是由本小区 K_0 个 RU 和邻小区 K_1 个 RU 的第 i 个数据组成的,可表示为

$$\hat{d}^{(i)} = (\hat{d}_i^{(1)}, \dots, \hat{d}_i^{(K_0)}, \dots, \hat{d}_i^{(K_0+K_1)})^T \quad (22)$$

与传统的单小区空时联合处理相比,估测数据中增加了 K_1 个邻小区强干扰用户的数据。这部分数据目前暂未使用,但在理论上该数据可以与该用户所在小区所检测出的数据一起,用作对该用户数据的空间分集。

假定噪声和数据都是随机独立,空间干扰的协方差阵 $R_n = \sigma^2 I$, σ^2 为噪声功率, I 为单位阵。数据的协方差阵 $R_d = I$, 则(18)式可以简化为

$$\hat{d} = (A^H A + \sigma^2 I)^{-1} A^H e \quad (23)$$

由上述推导可以看出:算法的运算量主要集中在 $(A^H A + \sigma^2 I)^{-1}$ 的求逆运算。 $(A^H A + \sigma^2 I)$ 为分块矩阵,对每一块实施 cholesky 分解,以达到降低运算量的目的。

4 性能仿真

4.1 仿真模型

为了测试多小区空时联合处理系统的性能,建立 TD-SCDMA 系统上行链路的仿真模型。智能天线仅用于基站,采用具有 8 个天线单元的等间距线阵。

图 2 所示为移动台的发射机结构。来自用户的数据比特流先进行卷积码编码和交织,再进行 QPSK 调制。数据流经扩频和脉冲成型后经数模转换器,再经滤波和放大器发射出去。

在接收端,采用具有智能天线的接收机结构如图 3 所示。来自不同天线的信号经滤波放大后送入模数转换器。数字信号被送入多小区空时联合处理单元。在该单元中,首先根据 3.1 节中智能天线的结构对来自各天线的信号进行相位调整,信号分成

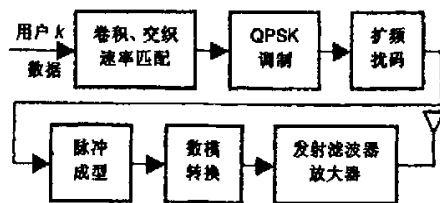


图2 发射机结构框图

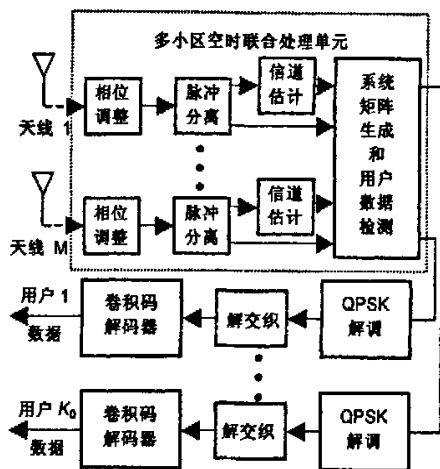


图3 接收机结构框图

midamble码和接收数据域两部分,前者按照3.2节中所描述的方法进行信道估计。信道估计的结果按照3.3节中介绍的方式生成系统矩阵,再按照(23)式的检测方法得到用户数据。经该模块处理后,将不同用户的数据流分开,最后经解调、解交织和卷积码解码得到原始的发射信号。

4.2 仿真结果

给出对AMR 12.2kbps业务的上行链路性能的仿真结果。具体仿真参数设置如下:

- (1) 天线模型:具有8个天线单元的线阵;
- (2) 信道模型:采用ITU的空间多径模型在智能天线下的扩展^[13],包括移动速度为3 km/h的室内-室外模型(OTIA)和移动速度为120 km/h的车载模型(VEHA);
- (3) 信道编码:TD-SCDMA标准中规定的卷积码编码;
- (4) 帧结构:帧长为5 ms,每个用户占用两个扩频因子为16的RU;
- (5) 调制/解调方式:QPSK;
- (6) 载波频率:2 GHz;
- (7) 交织深度:20 ms;

图4为在OTIA和VEHA信道下,分别对本小区和单一邻小区各1个用户和各4个用户的情况下,对于AMR 12.2kbps业务的TD-SCDMA系统上行链路的仿真结果。图4中给出的是通过比较发送数据和接收数据得到的比特误码率。

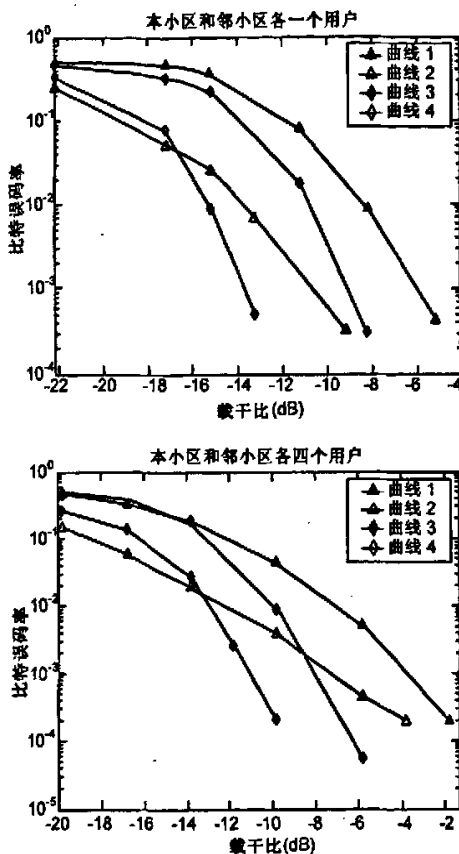


图4 不同条件下的比特误码率性能

图4中曲线1为OTIA信道下,采用单小区空时联合处理算法;曲线2为OTIA信道下,采用多小区空时联合处理算法;曲线3为VEHA信道下,采用单小区空时联合处理算法;曲线4为VEHA信道下,采用多小区空时联合处理算法。

4.3 仿真结果分析

从图4中可以看出多小区空时联合处理相比于单小区空时联合处理所带来的性能提升:在比特误码率为 10^{-3} 时,本小区和邻小区各1个用户的情况下,OTIA信道和VEHA信道可分别提高性能约4.8 dB和4.2 dB;本小区和邻小区各4用户情况下,OTIA信道和VEHA信道可分别提高性能约3.5 dB和3 dB。因此,采用消除邻近小区用户干扰

的多小区空时联合处理,能有效的抑制邻小区强干扰用户的干扰,性能明显优于传统的单小区空时联合处理算法。

4.4 实现中的考虑

在具体实现中需要考虑的问题包括:

(1) 邻区相关信息的获取。采用多小区空时联合处理,需要知道邻小区用户所采用的 midamble 码和扰码。在目前的系统中,本小区的 NodeB 是不需要知道这些信息的。因此,这些邻区信息需要在网络规划完成后作为系统参数配置在 NodeB 中。

(2) 邻区强干扰用户的确定。可以预先设定一个门限值,将计算出的邻区用户信道冲激响应与该门限值进行比较,超出该门限值的,认为是强干扰用户。可以根据系统除去处理本小区用户之外的剩余处理能力,决定最终参加联合检测的邻小区强干扰用户的数量。

(3) 实现复杂度的增加。与传统的单小区空时联合处理算法相比,多小区空时联合处理算法所增加的计算复杂度来自于两方面:

第一,对邻小区用户进行信道估计所增加的运算量。根据目前所采用的信道估计算法,信道估计部分的复杂度与参加多小区空时联合处理的邻小区个数呈线性关系;若考虑 N 个邻小区,信道估计部分的运算量比仅对本小区进行信道估计时增加 N 倍。

第二,考虑了邻小区强干扰用户后,对联合检测部分运算复杂度的提升。参加联合检测用户数增加,算法的复杂度也随之提高。对于多小区空时联合处理,如果不希望增加传统联合检测部分的最大复杂度,可以在本小区非满负荷工作的条件下采用多小区空时联合处理算法,参与联合检测的邻小区用户的最大值为本小区某一时隙本小区最大允许的用户数与本小区实际接入用户数之差。

因此,多小区空时联合处理算法增加的运算复杂度是系统可以接受的。

5 结论

着重论述了多小区空时联合处理算法的原理,并在 OTIA 和 VEHA 两种信道下分别对多小区空时联合处理算法和传统的单小区空时联合处理算法进行误码率性能比较。同时,也给出了具体实现时需要考虑的一些问题。从仿真结果可以明显地看出新算法性能的增益。因此,多小区空时联合处理算法与传统的单小区空时联合处理算法相比,可有效的抑制小区

间的同频干扰,提高系统性能,且运算复杂度可以接受,能够在实际系统中应用。

参考文献

- [1] Paulraj A J, Papadias B. Space-time processing for wireless communications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1997, 11(14): 49-83.
- [2] Ye Weichen, Bar-Ness, Alexander M H. Usage of smart antenna for cancelling neighboring base-station interferences in wireless CDMA communications[J]. IEEE Signals, Systems & Computers, 1997 Conference Record of the Thirty-first Asilomar Conference, 1998, 11(1): 640-644.
- [3] 3Gpp TS 25.221 v4.7.0, Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (TDD)[S]. 2002.
- [4] 李小文,李贵勇,陈贤亮,等. TD-SCDMA 第三代移动通信系统、信令及实现[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [5] Winters J H. Smart Antennas for Wireless Systems[J]. IEEE Personal Communications 1998, 1(5): 23-27.
- [6] Godara L C. Application of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility and System Considerations[J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(7): 1031-1060.
- [7] Godara L C. Application of antenna arrays to mobile communications, Part II: beam-forming and direction-of-arrival considerations [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(8): 1193-1245.
- [8] Steiner B, Jung P. Optimum and suboptimum channel estimation for the uplink of CDMA mobile radio systems with joint detection [J]. European Transactions Telecommunications Related Techniques, 1994, 5 (1): 39-50.
- [9] Klein A, Kaleb G K, Baier P W. Zero forcing and minimum mean square error equalization for multiuser detection in Code-Division Multiple-Access channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45(2): 276-278.
- [10] Blanz J, Klein A, Naqhan M, et al.. Performance of a cellular hybrid C/TDMA mobile radio system applying joint detection and coherent receiver antenna diversity[J]. IEEE Journal on Selected Areas in communications, 1994, 12(4): 568-579.
- [11] 潘伟强,胡斌杰,韦 岗,等. 一种新的无线信道多用户检测算法[J]. 电波科学学报, 2005, 20(6): 733-736.

(下转第 824 页)

186.

- [10] Chen Z Q. Theoretical solution of transient radiation from traveling-wave linear antennas[J]. IEEE Trans. on electromagnetic compatibility, 1988, 30(1): 80-83.
- [11] 宋祖勋,俞卞章. 无人机电磁环境效应评估及其准则研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(12): 2801-2804.
- [12] 赵振江,杜正伟,龚克. 电磁波激励下天线的响应特性分析[J]. 电波科学学报, 2005, 20(4): 418-423. Zhao Z J, Du Z W, Gong K. Analysis of response of antennas to electromagnetic waves excitation [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(4): 418-423.
- [13] Andrew, A. XM-1 Tank EMP susceptibility and survivability test program[R]. AD-A094627, Nov 1980.
- [14] High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) protection for ground-based C/I facilities performing critical, time-urgent missions [S]. MIL-STD-188-255. June 1990.
- [15] Clement D M, Johnson A W. Satellite survivability estimates[J]. IEEE Trans. on nuclear science, 1981, NS-28(6): 4198-4203.



谭志良 (1964—),男,湖南人,副教授,硕导、博士,中国物理学会会员,主要从事电子设备电磁效应与防护技术研究。



刘尚合 (1937—),男,山西人,教授,博导,中国工程院院士,国家自然科学基金委员会学科评审专家;国防科技重点实验室主任,主要从事静电与电磁防护理论与技术研究。



林永涛 (1977—),男,辽宁人,硕士研究生,主要从事电磁损伤效应研究。

(上接第820页)

- Pan W Q, Hu B J, Wei G, *et al.*. New multiuser detection algorithm for wireless channel[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(6): 733-736.
- [12] Vollmer M, Haardt M, Gotze J. Comparative study of joint-detection techniques for TD-CDMA based mobile radio systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(8): 1461-1475.
- [13] Ertel R B, Cardieri P, Sowerby K W, *et al.*. Overview of spatial channel models for antenna array communication Systems[J]. IEEE Personal Communications Magazine, 1998, 5(1): 10-22.



宋晓勤 (1973—),女,江苏人,东南大学信息科学与工程学院博士生。主要研究方向无线网络与通信。获国家发明专利6项, PCT专利1项,在国内外刊物发表论文10余篇,完成正式出版高等学校教材2部。



胡爱群 (1964—),男,江苏人,东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师,国家高科技发展计划信息安全技术主题专家组成员。主要从事无线网络及其安全技术的研究工作。先后承担并完成了国家高科技发展计划项目、教育部优秀教师资助计划项目、九五国家科技攻关计划项目、国家信息关防项目等项目,在国内外重要期刊上发表学术论文100篇。



薛强 (1974—),男,山东人,鼎桥通信技术有限公司无线性能经理。目前主要从事 TD-SCDMA 系统的物理层算法研究及仿真工作。2001年毕业于北京邮电大学信息与工程学院获得博士学位。

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，一直致力和专注于微波、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>