

基于 TD-SCDMA 系统下行链路的码复用方案

廖燕燕 彭振宇 杨大成
(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘要: TD-SCDMA 系统是码字受限系统, 为使有限的扩频码在高速率数据下行链路中支持更多用户, 该文提出了码复用方案。文中采用智能天线技术, 充分利用用户空间分割度较大的空间特征, 实现若干高速用户共享同一码字, 提高了对有限码资源的利用率。该文对使用若干种波束赋型算法的码复用系统进行仿真, 结果表明了其性能与非码复用系统性能相近; 对传统零约束赋形算法加以改进, 仿真结果表明改进的算法对系统性能的改善较为明显, 尤其适用于高速下行链路若干少量用户同时工作的情况。

关键词: TD-SCDMA; 码字受限; 码复用; 智能天线

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2926-04

A Code-reuse Scheme in the Downlink of TD-SCDMA System

Liao Yan-yan Peng Zhen-yu Yang Da-cheng

(Telecom Engineering College, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The TD-SCDMA system is code-limited. A code-reuse scheme is proposed to make the limited spreading codes support more subscribers. The smart antenna technique is used to realize the scheme. It takes advantaged of the big differences of space characteristic among subscribes to meet the demand of reuse of same spreading codes for several high data rate of users. This can improve utilization of code resources. In comparisons of system performances using several beam-forming algorithms, the results show that performance of the system using the code-reuse scheme is almost the same as that of traditional system; Moreover, an improved algorithm based on tradition null-steering method is proposed, which can improve system performance, especially for the high data rate downlink with a few subscribers.

Key words: TD-SCDMA; Code-limited; Code-reuse; Smart antennas

1 引言

时分同步码分多址(TD-SCDMA)系统, 中国提出的基于时分双工(TDD)方式的第三代移动通信系统, 采用了智能天线、联合检测等多项关键技术来抑制和消除多址干扰、同信道干扰和码间干扰, 并能够实现时分多址、码分多址和空分多址多种机制的结合, 具有无线资源利用率高和系统容量高等优势。随着移动通信的发展, 用户对数据速率和服务质量要求越来越高, 如何充分利用有限无线资源传送更多数据是研究热点之一。TD-SCDMA 系统中, 无线资源包括码字、频率、时隙、功率和空间角度。码复用方案, 即是在系统使用频分、时分和码分的基础上引进空分思想, 实现同一时隙不同用户使用相同扩频码。该文即是采用智能天线技术来实现码资源复用。

TD-SCDMA 是码字受限系统, 在同一频带同一时隙能容纳的最大用户数, 取决于扩频增益及每用户占用的码道数, 而该系统下行扩频增益最大值仅为 16。比如在 144kbps 下行数据链路中, 每个用户占用 8 个码道, 则同一时隙最多

只能容纳 2 个用户。而在一个小区内会同时存在几个高速数据用户与其他语音及低速数据用户的情况, 则此时无法再支持更多用户。该文提出的码复用方案, 即是利用部分用户间的空间分离度足够大来实现用户码资源的重用。

码复用方案, 也可以说, 在 TD-SCDMA 系统局部中引进空分多址(Space Division Multiple Access, SDMA)机制, 使少量用户共享频域、时域和码域资源。码复用方案较完全的空分多址技术简单且容易实现, 尤其适用于现有通信系统中高速数据速率的下行链路。因为高速下行链路中激活用户相对少些, 而如果这些少量用户空间分割度足够大, 那么可以充分利用智能天线的自由度来实现空分效果, 借助波束赋型进行空间滤波, 滤除其它用户干扰尤其是使用相同扩频码用户间的同码道干扰, 以提高系统性能, 实现码复用方案。

接下来该文对码复用系统进行理论分析和仿真。文中采用零约束、信噪比最大化和信干噪比最大化 3 种波束赋型算法, 并对传统的零约束算法加以改进。仿真结果表明, 码复用系统(即局部空分多址机制)在智能天线空间滤波技术下, 性能接近于非码复用系统性能, 验证了方案的有效性和可行性; 同时系统采用改进的零约束算法后, 性能得到一

定改善。

2 系统模型

2.1 连续时间信号模型^[1](如图 1 所示)

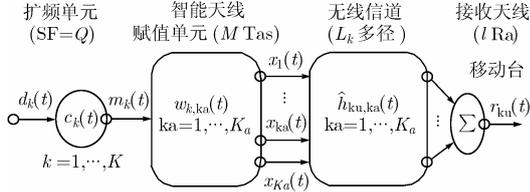


图 1 连续时间信号系统传输模型图

假设基站智能天线使用 M 天线阵元的均匀圆阵, 小区内 K 个移动台, 每个移动台 1 根接收天线, 采用 QPSK 调制, 并进行扩频及加扰。下行链路中用户 k 数据的基带信号:

$$m_k(t) = d_k(t) \cdot c_k(t) \quad (1)$$

其中
$$d_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_k[n]g_{d,k}(t - nT_b) \quad (2)$$

$$c_k(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_k[n]g_{c,k}(t - nT_c) \quad (3)$$

式中 $d_k[n] \in \{1, 0\}$ 为用户数据, $\alpha_k[n] \in \{\pm 1 \pm j\}$ 为 OVFS 码和扰码的乘积, 统称为扩频码片, $g_{d,k}(t)$ 和 $g_{c,k}(t)$ 分别是用户基带数据信号和扩频码片的脉冲成形函数, T_b 和 T_c 是为用户基带数据信号周期和扩频码片周期, 扩频增益 $Q = T_b / T_c$ 。

基站下行链路第 ka 个天线阵元的输出:

$$x_{ka}(t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} w_{k,ka}^H m_k(t) \quad (4)$$

其中 $w_{k,ka} \in C$ 为用户 k 的发送数据的第 ka 根天线的复加权重值。

空间矢量信道模型的冲激响应为

$$\hat{h}_{ku,ka}(t) = \sum_{l=1}^{L_k} \tilde{h}_{ku,ka,l} \delta(t - \tau_{ku,l}) \quad (5)$$

其中 $\tilde{h}_{ku,ka,l} = \beta_{ku,ka,l} a_{ku,ka}(\theta_{ku,l})$ 为复数, $\beta_{ku,ka,l}$ 表征基站第 ka 根天线与接收用户 ku 之间第 l 径经历的从基站到用户的衰落, 包括慢衰和快衰, $\alpha_{ku,ka}(\theta_{ku,l})$ 为基站发送数据到用户 ku 的第 ka 导引量, 其中 $\alpha_{ku}(\theta_{ku,l}) = [a_1(\theta_{ku,l}), a_2(\theta_{ku,l}), \dots, a_M(\theta_{ku,l})]^T$ 构成发送到用户 ku 的导引向量, $\theta_{ku,l}$ 是基站到接收用户 ku 第 l 径的离开角 DOD(Direction Of Departure)。

信号经过信道后, 移动台用户 ku 接收到的合成信号:

$$\begin{aligned} r_{ku}(t) &= \sum_{ka=1}^M \sum_{k=1}^K \sqrt{P_k} w_{k,ka}^H m_k(t) \otimes \hat{h}_{ku,ka}(t) + n_{ku}(t) \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{ka=1}^M \sqrt{P_k} w_{k,ka}^H m_k(t) \otimes \sum_{l=1}^{L_k} \tilde{h}_{ku,ka,l} \delta(t - \tau_{ku,l}) + n_{ku}(t) \\ &= \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{ka=1}^M \sqrt{P_k} w_{k,ka}^H m_k(t) \otimes \tilde{h}_{ku,ka,l} \delta(t - \tau_{ku,l}) + n_{ku}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中, \otimes 为卷积运算, $n_{ku}(t)$ 表示用户 ku 接收端的高斯

白噪声, 单边功率谱密度为 N_{ku} 。

假设用户 $1, 2, \dots, D$ 使用相同扩频码, 用户 $D+1, \dots, K$ 使用其它扩频码, 用户 1 为期望用户, 第 1 个多径是主径, 则上式重写为:

$$\begin{aligned} r_{ku=1}(t) &= \sqrt{P_1} w_{1,ka}^H m_1(t) \otimes \tilde{h}_{ku,ka,1} \delta(t - \tau_{ku,1}) \\ &+ \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{ka=1}^M \sqrt{P_1} w_{1,ka}^H m_1(t) \otimes \tilde{h}_{ku,ka,l} \delta(t - \tau_{ku,l}) \\ &+ \sum_{k=1}^K \sum_{ka=1}^M \sqrt{P_k} w_{k,ka}^H m_k(t) \otimes \hat{h}_{ku,ka}(t) + n_{ku}(t) \\ &= r_{ku,1,l=1}(t) + \sum_{l=1}^{L_k} r_{ku,1,l}(t) + \sum_{k=1}^K r_{ku,k}(t) + n_{ku}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $r_{ku,1,l=1}(t)$ 表示移动台 $ku=1$ 接收到的期望用户的主径数据, 其他为干扰数据。

移动台采用联合检测对接收数据进行相关检测, 由

$$e_{ku}(n) = \frac{1}{T_b} \int_{nT_b}^{(n+1)T_b + \tau_{ku}} r_{ku}(t) c_{ku}^*(t - \tau_{ku}) dt \quad (8)$$

得检测后的数据, 经简化得:

$$\begin{aligned} e_{ku=1}(n) &= d_{ku=1}[n] + \text{ISI}_{ku=1}[n] + \sum_{k=2}^D \text{CCI}_k[n] \\ &+ \sum_{k=D+1}^K \text{MAI}_k[n] + N_{ku=1}[n] \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中 $d_{ku=1}[n]$ 为期望用户数据, $\text{ISI}_{ku=1}[n]$ 为用户 1 除主径外的其余 $L_k - 1$ 径对主径的符号间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI), $\text{CCI}_k[n]$ 表示使用相同扩频码用户间的同码道干扰 (Co-Code Interference, CCI), $\text{MAI}_k[n]$ 表示用户间多址干扰 (Multi-Access Interference, MAI), $N_{ku=1}[n]$ 为移动台 1 接收端高斯白噪声经过相关器的输出。

联合检测技术能有效地消除小区内多址干扰 (MAI) 和符号间干扰 (ISI); 智能天线技术通过空间滤波可从空间上滤除非期望用户的数据干扰。与非码复用系统相比, 码复用系统增加了同码道干扰, 联合检测技术本身不能消除同码干扰, 因此在各种干扰并存的情况下, 可优先考虑利用智能天线来消除同码干扰, 以正确解出用户数据。

2.2 离散信号模型^[2](如图 2 所示)

基站端发送的数据如下:

$$\underline{d} = (\underline{d}^{(1)T}, \underline{d}^{(2)T}, \dots, \underline{d}^{(K)T})^T \quad (10)$$

其中 $\underline{d}^{(k)} = (\underline{d}_1^{(k)}, \underline{d}_2^{(k)}, \dots, \underline{d}_N^{(k)})^T$ 是用户 k 的数据向量, N 为下行突发中一个数据块的传输符号数。

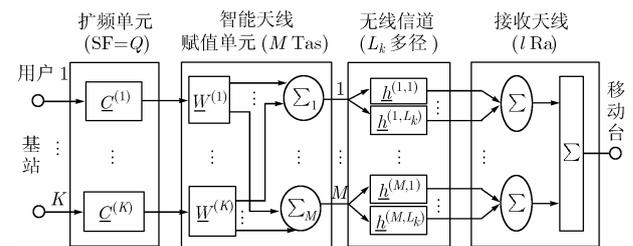


图 2 离散信号系统传输模型图

参考图 1, 移动台接收到的信号可表示成:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A} \cdot \underline{\mathbf{d}} + \mathbf{n} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{A} = (\mathbf{A}_{ij})$, $i = 1, 2, \dots, NQ + W - 1$, $j = 1, 2, \dots, KN$;

$$\mathbf{A}_{Q(n-1)+l, n+N(k-1)} = \mathbf{b}_l^k, \quad k = 1, 2, \dots, K; n = 1, 2, \dots, N; l = 1, 2, \dots, Q + W - 1.$$

移动用户 ku 总冲激响应 $\underline{\mathbf{b}}^{(k)} \in C^{Q+W-1}$ 是由扩频码 $\underline{\mathbf{c}}^{(k)}$, 天线权值 $\underline{\mathbf{w}}^{(k)}$ 和信道 $\underline{\mathbf{H}}^{(k)}$ 共同构成, 具体推导过程参考文献[2]。

码复用系统中, 当用户使用相同扩频码时, 矩阵 \mathbf{A} 中构成 \mathbf{b}_l^k 的 $\underline{\mathbf{c}}^{(k1)}$ 和 $\underline{\mathbf{c}}^{(k2)}$ 一样, \mathbf{b}_l^{k1} 和 \mathbf{b}_l^{k2} 之间体现了同码干扰影响。使用扩频码相同, 则无法借助联合检测消除同码干扰, 于是要求智能天线产生的加权向量 $\underline{\mathbf{w}}$ 使 \mathbf{A} 中的 $\mathbf{b}_l^k (k = 2, \dots, D)$ 同码干扰因子尽可能地小。这样, 就弥补了联合检测无法检出使用相同扩频码用户数据的不足, 有助于解出期望用户数据。

3 智能天线波束赋型算法

3.1 零限约束算法

零限约束波束赋型算法[3], 是在期望用户主径方向形成单位冲激响应, 除主径外其余径及干扰用户所有多径方向上置 0。此算法在接收不相关多径下能有效消除不相关径干扰。

假设用户 k 某多径方向的导引向量 $\mathbf{a}^{k, kd}$, 则构成用户导引向量矩阵:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}^{1,1}, \dots, \mathbf{a}^{1, L_1}, \mathbf{a}^{2,1}, \dots, \mathbf{a}^{2, L_2}, \dots, \mathbf{a}^{K,1}, \dots, \mathbf{a}^{K, L_K}] \quad (12)$$

引入向量 $\mathbf{e} \in R^{1 \times (K \cdot L_k)}$, 将 \mathbf{e} 中第 $k \cdot kd$ 列元素置为 1 (即在期望用户 k 第 kd 主径形成单位冲激响应), 其余元素为 0。则用户 k 天线权值向量:

$$\underline{\mathbf{w}}^{(k)} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{A}^H (\mathbf{A} \mathbf{A}^H)^{-1} \quad (13)$$

上式在满足 $M \leq K \cdot L_k$ 成立。此算法在局部采用 SCDMA 机制简单易实现。

3.2 信噪比最大化算法

与零限约束算法相比, 此算法的思想是通过最大化期望用户的信噪比 SNR 来消除同码等其他干扰, 获取较好的系统性能, 实现码复用。

根据 SNR 最大化算法[2,3], 计算出用户天线权值:

$$\underline{\mathbf{w}}^{(k)} = \arg \max \frac{\underline{\mathbf{w}}^{(k)H} \mathbf{R}^{(k)} \underline{\mathbf{w}}^{(k)}}{\underline{\mathbf{w}}^{(k)H} \mathbf{R}_N \underline{\mathbf{w}}^{(k)}} \quad (14)$$

其中 $\mathbf{R}^k = \mathbf{H}^{(k)H} \mathbf{C}^{(k)H} \mathbf{C}^{(k)} \mathbf{H}^k$, $\mathbf{R}_N = \sigma^2 \mathbf{E}$, σ^2 为噪声方差。

3.3 信干噪比最大化算法

同上述算法相比, 信干噪比最大化算法[2,3]引进了干扰用户因子, 使系统中期望用户信干噪比 SINR 最大化, 保证系统中每个用户 SINR 都保持在一定的数值以上, 综合考虑了噪声功率和干扰用户功率的影响。

用户天线权值计算公式如下[2,3]:

$$\underline{\mathbf{w}}^{(k)} = \arg \max \frac{\underline{\mathbf{w}}^{(k)H} \mathbf{R}^{(k)} \underline{\mathbf{w}}^{(k)}}{\underline{\mathbf{w}}^{(k)H} \left(\sum_{ku \neq k} \mathbf{R}^{(ku)} + \mathbf{R}_N \right) \underline{\mathbf{w}}^{(k)}} \quad (15)$$

3.4 改进的零限约束算法

与传统零限约束算法相比, 此处不仅仅考虑期望用户和干扰方向的单方向简单赋值, 同时在充分利用天线自由度的前提下综合考虑 360° 全平面, 对所有激活用户以外的方向进行优化处理, 将相应冲击响应置零, 并且给单位冲激响应适当增加幅度。仿真表明, 较之传统零限约束算法, 改进后的算法效果明显, 使得期望用户方向和干扰方向的波束幅值之比更大化。

激活用户数 K 小于天线数 M ($\Delta m = M - K$), 则由 $\underline{\mathbf{w}}^{(k)} \cdot [\mathbf{A}, \mathbf{A}_{\Delta m}] = [\mathbf{e}, \mathbf{e}_{\Delta m}]$ ($\mathbf{e}_{\Delta m}$ 为 $1 \times \Delta m$ 的零向量), 得到用户天线权值为

$$\underline{\mathbf{w}}^{(k)} = [\mathbf{e}, \mathbf{e}_{\Delta m}] \cdot [\mathbf{A}, \mathbf{A}_{\Delta m}]^H ([\mathbf{A}, \mathbf{A}_{\Delta m}] [\mathbf{A}, \mathbf{A}_{\Delta m}]^H)^{-1} \quad (16)$$

4 仿真结果

仿真环境采用 TD-SCDMA 系统 case 3[4] 信道的下行链路, 车载速度 120km/h, 两个用户占用 8 个相同扩频码扩频的码道传送高速数据。仿真分别对采用传统以及改进的零限约束算法(improved NC), 最大 SNR (MSNR) 和最大 SINR (MSINR) 波束赋型算法进行仿真, 仿真条件见表 1。

表 1 系统主要配置参数

数据速率	144kbps
码片速率	1.28Mcps
扩频码	SF=16, 每个用户占用 8 个码道
系统激活用户	2 个
SA 算法	(1)MSNR;(2)MSINR;(3)traditional NC;(4)improved NC
联合检测	迫零块线性均衡器 (ZF-BLE)
其他技术	无

由仿真结果看出(图 3), 使用改进的零限约束算法系统性能优于最大 SNR 和最大 SINR 算法, 而传统零限约束算法性能明显低于其他算法。分析可得, 若波束赋型算法仅考虑对激活用户(包括期望和干扰用户)方向上进行处理, 次优赋型算法 MSNR 和 MSINR 消除干扰的效果优于传统零限约束算法; 而改进的零限约束算法, 在天线自由度剩余的情况下综合考虑全平面的波束赋型, 将激活用户以外的其他方向天线增益置零, 优化了天线波束, 使得期望用户与干扰方向波束增益比值更大, 充分利用了天线的自由度, 且计算复杂度不大。

所以, 码复用方案适用于少量高速用户的下行链路业务, 而且采用零限约束算法简单可行。而 CDMA 系统容量的瓶颈主要在于下行链路, 因此码复用技术是提高其容量的有效手段。

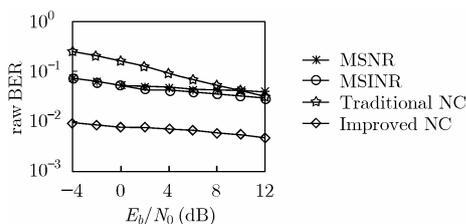


图 3 误码率-信噪比关系曲线图

5 结束语

本文主要研究了在 TD-SCDMA 下行高速数据速率链路中的码复用方案。相对于完全的 SCDMA 机制, 码复用方案, 是当系统提供的扩频码已经分配完之后尚有新用户要传送数据, 于是将已分配过的扩频码再次利用, 实现部分用户对码资源的共享; 二者区别在于, 码复用对空间分离度足够大的用户分配相同扩频码, 而不是系统中所有用户依靠空间区分, 这尤其适用于存在少量高速用户的下行链路。因此, 在系统链路中如果存在少量数据速率用户, 采用码复用方案能有效解决码字受限的问题。

本文重点仿真了采用几种不同智能天线波束赋型算法的码复用方案的系统性能, 并加以比较(跟非码复用系统比较^[2]), 看出性能还较好。可见智能天线技术利用用户的空分特性, 合理分配码资源, 使不同用户共享码资源, 增加系统的容量。总之, 码复用方案是一套提高系统容量行之有效的办法。如果码复用系统和动态信道灵活结合使用, 对空间分

离度较大的用户使用码复用方案, 分离度很小的用户动态分配到其他信道, 这将更有效提高系统性能和提高系统容量。

参考文献

- [1] Lim S S and Manikas A. Code reuse type array DS-CDMA systems. Proceedings of the 1998 IEEE global telecommunications conference, GLBERCOM 1998: 3957-3926.
- [2] Peng Zhenyu, Guo Jing, Wang Yafeng, and Yang Dacheng. Performance evaluation of various data detection algorithms in the downlink of TD-SCDMA systems with smart antennas. The First IEEE and IFIP International Conference in Central Asia, Bishkek Kyrgyzstan on 26-28 Sept. 2005: 1-5.
- [3] Godara L C. Application of antenna arrays to mobile communications. II. Beam-forming and direction-of-arrival considerations. Proceedings of IEEE International Conference, Santa Barbara, California, USA, 1997, 85 (8): 1193-1245.
- [4] 3GPP TS 25.201: Physical Layer -General Description.

廖燕燕: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为 TD-SCDMA 移动通信系统中智能天线技术的研究。

彭振宇: 男, 1981 年生, 工程师, 研究方向为智能天线技术的研究。

杨大成: 男, 1951 年生, 博士生导师, 研究方向为移动通信系统中的理论和实现。