

基于频域均衡的 CP - SC - CDMA 下行链路性能分析

刘 亮, 邵定蓉, 李署坚, 张彦仲

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘 要:基于循环前缀的单载波频域均衡码分多址系统 CP - SC - CDMA 能够消除多径信道引起的数据块之间的干扰,同时利用简单的单抽头频域均衡代替传统的复杂度较高的 RAKE接收机和时域均衡器弥补时间弥散带来的频率选择性衰落。从理论上分析 CP - SC - CDMA 系统中固有的残余码间干扰问题,并针对多用户下行链路对各种合并分集方案进行比较,从理论分析和仿真结果两方面给出最小均方误差合并方案是折中残余码间干扰和信噪比的最佳合并方案。

关键词:循环前缀; CP - SC - CDMA; 频域均衡; 合并方案

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2009)06-0006-04

前 言

基于 RAKE接收机的宽带直扩码分多址 (DS - CDMA)技术在第三代移动通信系统中得到了广泛的应用,但它只能够支持每秒几兆比特数据率的业务。随着用户对宽带业务需求的增加,未来移动通信系统往往需要占用很大的无线传输带宽,能够提供高速数据传输 (接近 1Gb/s),因此信道传输时延带来的频率选择性衰落将更加严重,传统的基于 RAKE接收机和时域均衡器的 DS - CDMA 系统的性能会更加恶化,同时实现复杂度大大提高^[1]。另外,多载波码分多址 (MC - CDMA)系统可以通过简单的单抽头频域均衡克服频率选择性信道带来的影响,从而引起了学者的广泛关注,但 MC - CDMA 和正交频分复用 (OFDM)一样都具有峰平比 (PAPR)高和对频率偏移敏感的问题,限制了其性能的提高^[2,3,6]。最近提出来的基于循环前缀的单载波码分多址系统 (CP - SC - CDMA)可以用与 MC - CDMA 同样复杂度的系统实现几乎相同的性能,同时保持了单载波系统对 PAPR 和频率偏移的强健性,这种系统近期得到了广泛的研究和关注,并使它成为下一代无线通信系统有力的竞争者^[4,5,7]。

CP - SC - CDMA 系统虽然可以获得很好的性能,但是与 MC - CDMA 系统不同的是这种单载波频域均衡系统存在固有的残余码间干扰 (ICI),从而很大程度上限制了其性能的进一步提高。本文从理论上对这种固有的残余码间干扰进行分析,并从抑制残余码间干扰和提高信噪比两个方面对各种频域均衡 (FDE)合并方案进行比较,指出最小均方误差合并方案 MMSEC 是折中残余码间干扰和信噪比的最佳合并方案。

1 CP - SC - CDMA 下行链路传输模型

CP - SC - CDMA 下行链路传输模型如图 1 所示。

在基站发射端,首先将 u 个用户 ($u = 1, 2, \dots, U$) 的二进制数据调制成符号 b_u ,然后用正交扩频序列 c_u 分别对每个用户的符号进行扩频并叠加,最后用扰码 c_{scr} 对复用后的信号进行加扰,使得调制后的下行信号接近于白噪声。数据流被分割成长度为 N 的数据块,长度为 N_g 的循环前缀 (CP) 扩展到每个数据块的首部,这里假设 N_g 大于多径信道最大时延长度 L ,并且多径信道是块频率选择性衰落 (信道增益在每个数

据块长度内保持恒定)。

移动用户首先去除每个数据块的 CP,串并转换后进行 N 点快速傅立叶变换 (FFT) 得到 N 个子载波信号 (为了方便理解,借用 OFDM 的子载波概念,虽然没有用到多载波调制),然后对每个子载波信号进行频域均衡, FDE 后的信号由 N 点逆快速傅立叶变换 (IFFT) 将信号由频域变回时域,最后解扰,解扩,解调后得到用户的数据。

2 残余码间干扰理论分析

文中采用码片级的描述方法,假设系统存在 N 个子载波和 U 个用户,数据块间的干扰 (BI) 被 CP 去除,因此只需要考虑每个独立的数据块。接收端去除 CP 后,用户接收机接收到的离散形式等效基带模型可以表示为

$$r = hs + n = hCPb + n \quad (1)$$

其中, $C \triangleq [c_1, c_2, \dots, c_U]$ (满足 $C^H C = N I_U$), $P \triangleq \text{diag}\{\sqrt{P_1}, \sqrt{P_2}, \dots, \sqrt{P_U}\}$ 和 $b \triangleq [b_1, b_2, \dots, b_U]^T$ 分别代表 U 个用户的扩频序列、信号功

率和数据符号, $n \triangleq [n_0, n_1, \dots, n_{N-1}]^T$ 为零均值高斯白噪声矢量。CP 的插入使得发射信号与信道的线性卷积变为循环卷积,因此信道矩阵 h 是循环矩阵,表示如下

$$h_{ij} = \begin{cases} h_{(i-j) \bmod N}, & |i-j| < L \\ 0, & |i-j| \geq L \end{cases} \quad (2)$$

将 r 进行 FFT、频域均衡、IFFT 运算,同时对信道矩阵进行奇异值分解,可得

$$\begin{aligned} y &= F^H \cdot G \cdot F \cdot h \cdot s = F^H \cdot G \cdot F \cdot F^H \cdot H \cdot F \cdot s \\ &= F^H \cdot \mathfrak{H} \cdot F \cdot s \\ &= \mathfrak{H} \cdot s \end{aligned} \quad (3)$$

其中, G, H, \mathfrak{H} 均为对角矩阵,对角线元素分别是信道均衡系数 $G(k)$ 、信道增益系数 $H(k)$ 和信道均衡后的每个子载波等效增益系数 $\mathfrak{H}(k)$, $y \triangleq [y_0, y_1, \dots, y_{N-1}]^T$ 为 IFFT 后的时域扩频信号, F 为归一化离散傅立叶变换矩阵, \mathfrak{H} 为信道均衡后等效信道矩阵。

根据公式 (3),我们可以得到两种情况下的不同结论:

第一种情况:当对角矩阵 \mathfrak{H} 的对角线元素 $\mathfrak{H}(k) \triangleq A, k = 0, 1, \dots, N - 1$ 时, A 是常量,可得, $y = \mathfrak{H}s = A \cdot F^H \cdot F \cdot s = A \cdot s$,该情况下系统没有符号间干扰,从而保证了各用户间扩频码的正交性,经过解扰、解扩和解调后可以得到用户的数据。

第二种情况:当对角矩阵 \mathfrak{H} 对角线元素 $\mathfrak{H}(k) \neq A, k = 0, 1, \dots, N - 1$ 时,等效信道矩阵 \mathfrak{H} 不再是对角阵,而是具有和信道矩阵 h 类似形式的非因果循环矩阵,如公式 (4) 所示,从而带来了残余码间干扰,破坏了用户扩频码间的正交性。随着用户数增多,这种残余码间干扰对性能的影响将更加严重。

$$\mathfrak{H} = \begin{bmatrix} \mathfrak{H}_0 & \mathfrak{H}_{-1} & \mathfrak{H}_{-2} & \dots & \mathfrak{H}_{-1} \\ \mathfrak{H}_1 & \mathfrak{H}_0 & \mathfrak{H}_{-1} & \dots & \mathfrak{H}_2 \\ \dots & \ddots & \ddots & \dots & \dots \\ \dots & & \ddots & \ddots & \dots \\ \mathfrak{H}_{-1} & \mathfrak{H}_{-2} & \dots & \mathfrak{H}_1 & \mathfrak{H}_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

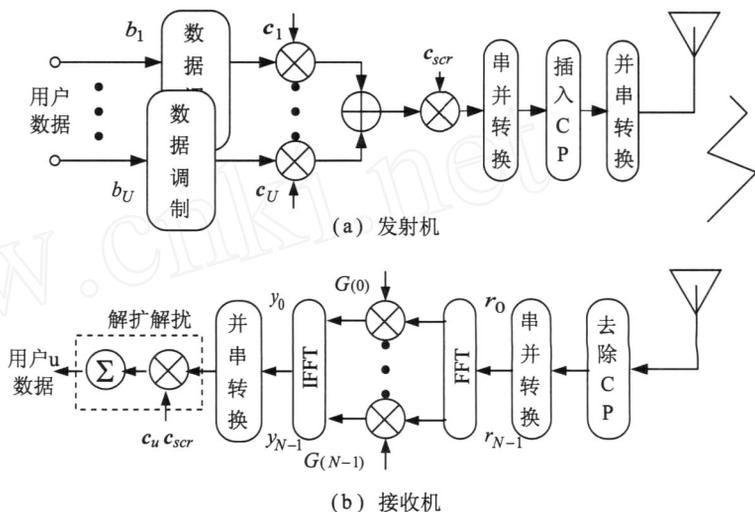


图 1 CP - SC - CDMA 下行链路传输模型

根据上述分析可知,矩阵 H 对角线元素是否等于或者接近于常量决定了残余码间干扰的大小,因此可以通过分析各种频域均衡合并方案的等效信道增益矩阵 H 来选取抑制码间干扰和提高信噪比的最佳合并方案。

3 CP - SC - CDMA 频域均衡合并方案分析

常用的频域均衡合并准则有迫零合并准则 (ZF)、最大合并比准则 (MRC)、等增益合并准则 (EGC) 以及最小均方误差合并准则 (MMSEC) 等^[2,6],不同准则下的信道均衡系数 $G(k)$ 如式 (5) 所示

$$G(k) = \begin{cases} \frac{1}{H(k)}, \text{ZF} \\ \frac{H^*(k)}{|H(k)|}, \text{EGC} \\ H^*(k), \text{MRC} \\ \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + \left(\frac{E_s}{N_0} \cdot \frac{U}{N}\right)^{-1}}, \text{MMSEC} \end{cases} \quad (5)$$

这里为了描述方便,假设用户 1 为需要检测的用户,其它用户的信号作为干扰,且用户 1 功率 $P_1 = E_s/T_s$, E_s 为每个符号的能量, T_s 为每个符号的时间宽度, N_0 为噪声的单边功率谱密度。

根据式 (3) 和式 (5) 可以看出,迫零合并准则下 $H(k) = G(k) \cdot H(k) = 1$ 是常量,可以完全消除残余码间干扰,但在子载波信道增益比较低的位置它会提高噪声功率,从而降低信噪比,制约了系统性能的提高,这种情况在低信噪比下尤为严重;最大合并比准则等效于匹配滤波器,因此可以最大限度地提高信噪比,但同时也增加了频率选择性衰落信道带来的残余码间干扰,同样制约了系统性能的提高;等增益合并准则介于迫零准则和最大合并比准则之间,不能使系统获得最佳性能;相比之下,最小均方误差准则能够同时抑制残余码间干扰和提高信噪比,且在不考虑噪声影响的情况下等同于迫零准则。

图 2 给出了 $E_b/N_0 = 10\text{dB}$, $N = U = 64$, $L = 16$ 归一化功率时延多径衰落信道下的子载波等效增益系数波形。从图中可以很容易地看出,MMSEC 准则具有相对平坦的增益系数(峰平比小),因此可以很好地抑制残余码间干扰,同时相对 ZF 准则考虑了噪声的影响,从而使系统获取最佳的性能;MRC 和 EGC 准则则恶化了残余码间干扰,在用户多的情况下系统性能会进一步降低。

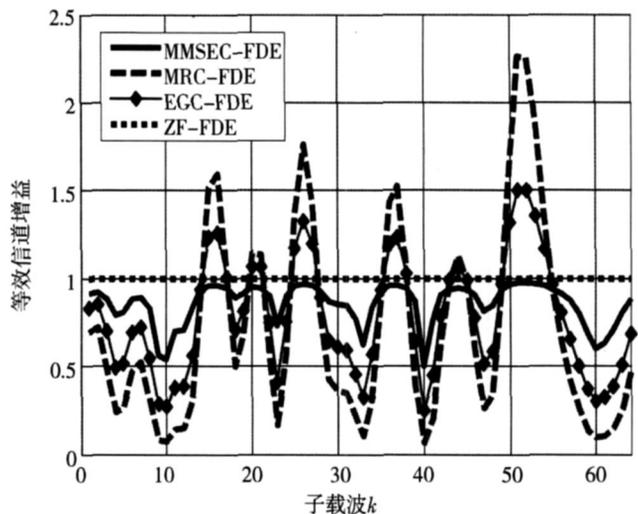


图 2 信道等效增益波形

表 1 系统仿真参数设置

系统方案	载波频率	3GHz
	码片速率	100MHz
	归一化多普勒频移	$f_d \cdot T_s = 0.0005$
发射机	调制方式	QPSK
	FFT点数	64
	循环前缀长度	16
	扩频码	长度 64 沃尔什码
无线信道	扰码	长度 4095 PN 码
	衰落	块频率选择性瑞利衰落
接收机	功率时延模型	16 路归一化功率时延模型 ^[4]
	频域均衡方案	ZF, EGC, MRC, MMSEC
	信道估计	理想

4 仿真结果

本文对 CP - SC - CDMA 多用户下行链路性能进行了 Monte Carlo 仿真^[8],仿真参数设置如表 1 所示。

图 3 给出了 ZF、MRC、EGC、MMSEC 四种合并方案下,系统存在单用户和满负荷情况下下行链路的比特误码率 (BER) 曲线。从图中看出,ZF 准则下,BER 曲线仅对信噪比敏感,对用户数保持强健性;MRC 和 EGC 准则下,BER 曲线对用户数非常敏感,当满负荷情况下,BER 曲线出现误码平台;MMSEC 准则下,BER 曲线受残余码间干扰的影响随着用户数的增多性能有所下降,但不会出现误码平台。

图 4 给出了 $E_b/N_0 = 10\text{dB}$ 条件下,ZF、MRC、EGC、MMSEC 四种合并方案的 BER 随用户数的变化曲线。从图中可以更清晰地看出,ZF 准则对用户数不敏感,任意用户数下均具有同样的误码率,但由于噪声的影响,误码率维持在一个比较高的值;MRC 准则下系统在 $U = 5$ 的情况下,BER 曲线与 MMSEC 几乎相同,但随着用户数增加,性能逐渐下降,甚至超过了 ZF 准则下的误码率。从图中可以看出,MMSEC 准则是折中残余码间干扰和信噪比的最佳合并方案,与前面的理论分析完全吻合。

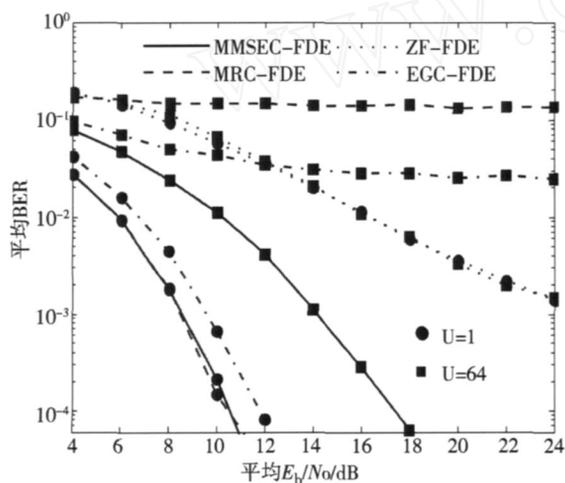


图 3 下行链路 BER 与 E_b/N_0 关系曲线

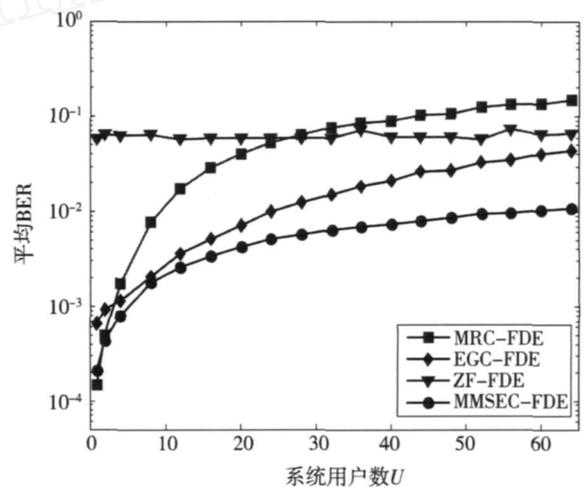


图 4 下行链路 BER 与系统用户数 U 关系曲线

5 结论

CP - SC - CDMA 系统可以用相同复杂度的收发信机实现与 MC - CDMA 系统相近的性能,同时具有 PAPR 小和对频偏不敏感的优点。但这种系统存在固有的残余码间干扰,在满负荷的情况下更加严重,从而影响了系统性能的进一步提高。本文从理论上对残余码间干扰进行了分析,并针对下行多用户链路对各种频域均衡合并方案进行了比较,从理论和仿真两方面说明了 MMSEC 是折中残余码间干扰与信噪比的最佳合并方案。

参考文献

- [1] Adachi F, Sawahashi M, and Suda H. Wideband DS - CDMA for next generation mobile communication systems[J]. IEEE Commun. 1998, 36(9): 56 ~ 59.
- [2] Hara S and Prasad R. Overview of multicarrier CDMA[J]. IEEE Commun. 1993, E76 - B(2): 113 ~ 119.
- [3] Hanzo L, Webb W, and Keller T. Single - and multi - carrier quadrature amplitude modulation. John Wiley & Sons, 2000.
- [4] Adachi F, Garg D, Takaoka S, and Takeka K. Broadband CDMA techniques[J]. IEEE Wireless Commun. 2005, 2(2): 8 ~ 18.
- [5] Baum KL, Thomas TA, Vook FW, and Nangia V. Cyclic - prefix CDMA: An improved transmission method for broadband DS - CDMA cellular systems[C]. in Wireless Communication and Networking Conf., vol. 1, Mar. 2002, 183 ~ 188.

(下转第 14 页)

formance in the satellite communication.

Key words: APSK modulation; Constellation; Minimum Euclidean distance; Pre-distortion; Satellite communication

[作者简介]

宫晓妍 1984年出生,研究生在读,中国通信学会会员。研究方向为卫星信道编码调制和移动通信技术。

刘建伟 1964年出生,教授,博士生导师,北京航空航天大学电子信息工程学院副院长。研究方向为无线通信、密码学、信息论、信道编码调制和通信网络安全保密技术。

杨友福 1982年出生,博士生在读。研究方向为卫星通信编码与调制技术。

(上接第 9 页)

[6] Fazel K and Kaiser S. Multi-carrier and Spread Spectrum Systems. John Wiley & Sons: Chichester, 2003.

[7] Falconer D, Ariyavisitakul S L, Benyam in - Seeyar A, and Eidson B. Frequency Domain equalization for single-carrier broadband wireless systems[J]. IEEE Commun. 2002, 40(4): 58 ~ 66.

[8] 约翰 G. 普罗基斯,张力军等译. 数字通信 [M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

Performance Analysis for CP-SC-CDMA Downlink Transmission Based on Frequency Domain Equalization

Liu Liang, Shao Dingrong, Li Shujian, Zhang Yanzhong

Abstract: The CP-SC-CDMA system based on Cyclic Prefix (CP) can remove the inter-block-interference (IBI) due to the multipath channel and meanwhile equalize the frequency-selective fading channel with simple one-tap frequency domain equalization (one-tap FDE) rather than the conventional RAKE receiver and time domain equalizer which possess high complexity. In this paper the theoretical analysis of the residual inter-code-interference (ICI) is presented and also some kinds of combining techniques are compared based on the multi-user downlink transmission. Results show that MMSE is the best combining technique which gives a good trade off between residual ICI and signal to noise ratio (SNR).

Key words: Cyclic prefix; CP-SC-CDMA; Frequency domain equalization; Combining technique

[作者简介]

刘亮 1983年生,北京航空航天大学博士研究生,从事扩频通信,频域均衡,OFDM,多址通信方面的研究。

邵定蓉 1937年生,北京航空航天大学教授,博士生导师,从事扩频通信,声光信号处理,导航定位方面研究。

李署坚 1953年生,北京航空航天大学教授,硕士生导师,从事扩频通信,导航定位方面研究。

张彦仲 1941年生,中国工程院院士,北京航空航天大学教授,博士生导师,从事信号处理领域快速算法等方面研究。