

基于多子波的 CDMA 系统¹

潘 进^{**} 焦李成^{*} 方洋旺^{*}

^{*}(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

^{**}(西安通信学院计算机与信息工程系 西安 710106)

摘 要 将多子波的分析滤波器、预处理以及平衡化等方面的最新研究成果应用于通信领域,提出了多子波码分多址(MW-CDMA)通信系统的理论框架。在 MW-CDMA 中,系统首先将接收信号投影到相互正交的子波空间上,然后在各子波空间中进行多用户解调。理论分析和仿真结果表明,这种系统可以很好地抑制多址干扰和环境噪声,同时也为减少解码的计算量提供了新的思路。

关键词 CDMA, 多子波, 平衡化, 分析滤波器

中图分类号 TN914.4, O177.6

1 引 言

在码分多址(CDMA)系统中,各用户重复地发射经过信息流调制的特征波形。接收端根据各用户特征码的不同来进行解调。目前研究最多的是直接序列扩频 CDMA(DS-CDMA)系统,它具有软容量和抗干扰等诸多优点。多址干扰、多径干扰和环境噪声是这种系统的主要问题。目前已有一系列文章讨论了如何设计优化的接收机,以便同时具有去噪和抗干扰的功能^[1-5]。另一方面,多子波理论的研究正在不断地深入。分析滤波器将信号投影到正交的子空间上进行处理不仅减少了解码的计算量而且使得 CDMA 中的特征码可以重复使用;时间上重叠的多个子波及其平移相互正交使得单位时间内可传输更多的 PN 码;优化设计的多子波时-频特性^[6,7]使得频带的利用更为有效。基于以上考虑,本文将多子波分析和多子波的预处理以及多子波的平衡化等方面的最新研究成果应用于通信领域,提出了多子波 CDMA(MW-CDMA)通信系统的理论框架。由于带通滤波器和数字解码器均有抑制噪声的功能,因此这种系统可以很好地抑制各种干扰和噪声。本文重点考虑系统的多址干扰和信道的高斯白噪声对系统性能的影响。为了分别考虑各种影响系统性能的因素,本文使用了正交特征码,这只是理想信道情况的假设,其目的在于考察系统的固有噪声,即用信号采样值近似作为初始尺度空间的尺度系数而产生的误差。

2 多子波

r 维向量函数 $\psi = (\psi^1, \psi^2, \dots, \psi^r)^t$ 称为是一个 r 重正交多子波,如果 $\{\psi_{j,k}^l(t) | l = 1, 2, \dots, r, j, k \in \mathbf{Z}\}$ 构成了 $L^2(R)$ 的一组标准正交基,其中

$$\psi_{j,k}^l(t) = 2^{j/2} \psi^l(2^j t - k) \quad (1)$$

函数集合 $\{\psi_{j,k}^l(t)\}$ 有时也被称为多子波。多子波的构造与多分辨分析紧密相关。 r 重多分辨分析是 $L^2(R)$ 的一个子空间序列 $\{V_j\}$, $\{V_j\}$ 应满足下列条件: (1) $V_j \subset V_{j+1}$, $j \in \mathbf{Z}$; (2) $\bigcap_{j \in \mathbf{Z}} V_j = \{0\}$, $\bigcup_{j \in \mathbf{Z}} V_j = L^2(R)$; (3) $f(t) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}$; (4) 存在一个 r 维向量函数 $\phi = (\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^r)^t$, 使得 $\{\phi_{0,k}^l | l = 1, 2, \dots, r, k \in \mathbf{Z}\}$ 构成了空间 V_0 的一组 Riesz

¹ 2001-02-11 收到, 2001-08-17 定稿

国家自然科学基金(批准号 69772029)、国家“863”计划资助项目

基, 其中 $\phi_{j,k}^l = 2^{j/2}\phi(2^j \cdot -k)$. 向量函数 ϕ 称为多尺度函数, $V_j, j \in \mathbf{Z}$ 称为尺度空间. 若 $\{\phi_{0,k}^l | l = 1, 2, \dots, r, k \in \mathbf{Z}\}$ 构成了 V_0 的标准正交基, 则 $\{V_j\}$ 称为正交多分辨分析. 对于正交多分辨分析, 设 W_j 是 V_j 在 V_{j+1} 中的直交补空间, 则 $W_i \perp W_j (i \neq j)$, 并且 $\sum_{j \in \mathbf{Z}} \ominus W_j = L^2(\mathbf{R})$. 若有函数集合 $\{\psi_{0,k}^l | l = 1, 2, \dots, r, k \in \mathbf{Z}\}$ 构成了空间 W_0 的标准正交基, 则称 $\psi(t)$ 为由 $\phi(t)$ 生成的正交多子波, 其中 $\psi_{j,k}^l$ 由 (1) 式给出 [6]. 我们感兴趣的是, 对于给定的 j , 如何从一个接收信号 $y(t)$ 求出其在子波空间 W_j 上的子波系数 $b_j^l[k]$. 这可以通过如下的两个步骤来完成. 首先, 由信号的采样值 $y[k] = y(t_k)$ 近似求出 $y(t)$ 在某个较大的尺度空间 V_j 上的尺度系数 $a_j^l[k]$. 这可以由多子波的预滤波器 [8,9], 或通过多子波的平衡化处理 [10] 来完成, 如图 1 所示 (图中以二维子波为例). 然后, 利用多子波分析滤波器可由尺度系数 $a_j^l[k]$ 求出所需的子波系数 $b_j^l[k]$.

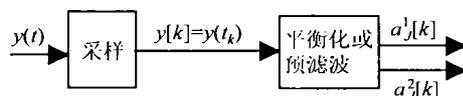


图 1 求信号在较大尺度空间 V_j 上的尺度系数的示意图

3 多子波 CDMA

设有多子波 $\{\psi_{j,k}^l\}$. 对于固定的 j 和 l , 支撑于 $[0, T]$ 的子波个数是固定的, 其中 T 表示信息码元的宽度. $\{\psi_{j,k}^l | \text{supp}(\psi_{j,k}^l) \in [0, T]\}$ 张成了 W_j 的一个子空间, 记为 $W_{j,l}$. $W_{j,l}$ 中的 $\psi_{j,k}^l$ 都是由 $\psi_{j,0}^l$ 的平移所构成的. 选取正交码作为系数, 这些 $\psi_{j,k}^l$ 可以组合出许多在 $[0, T]$ 上正交的特征波形, 这些正交特征波形具有相同的子片 $\psi_{j,0}^l$. 对于系统中的任一用户, 比如说第 i 个用户, 分配一个信息码元宽度的特征波形

$$TW_i = A_i \sum_k c_k^i \psi_{j,k}^l \quad (2)$$

为了安全, 还可以用一个不定长度的双极序列 $S^i = \{s_n^i\}$ 来构造一个长特征波形

$$LW_i = \sum_n s_n^i TW_i(t - nT) \quad (3)$$

这样, 第 i 个用户的特征就由

$$(j, l, TW_i, S^i) \quad (4)$$

所完全确定. 我们将 (4) 式称为第 i 个用户的特征码. 从子波分析的角度看, 特征码的第 1 分量 j 规定了该用户使用的信号属于子波空间 W_j . 同时, j 分量也具有与 DS-CDMA 中的扩频增益相类似的功能. 第 2 分量 l 说明了该用户的信号属于 W_j 的子空间 $W_{j,l}$. 对于不同的 l , (2) 式中的双极码 c_k^i 可以相同, 这使得宝贵的正交码在系统中可以重复使用. 特征码的第 3 分量具有正交性, 利用这一性质我们可以将信号进行分离. 特征码的前 3 个分量是系统设定的,

用户不能更改。特征码的第 4 个分量, 即安全序列的长度和极性都可由用户随时更改。在已知特征码的前 3 个分量而不知道安全码的情况下, 虽然能分离出该用户的信号但不能解出信号中所载的信息。注意, 安全码的更改只与该用户信息的解调有关, 而与系统的其它设置无关。

如上所述, 第 i 个用户所发出的信号为

$$s_i(t) = A_i \sum_n b_i[n] \tilde{s}_n^i TW_i(t - (n - 1)T) \tag{5}$$

其中 \tilde{s}_n^i 表示 s_n^i 对 n 进行周期延拓而得到的周期序列。 A_i 反映了发射功率的大小, 由于有正交性的假定, 故可设 $A_i = 1$ 。在只考虑多址干扰的情况下, 接收到的混合信号为

$$y(t) = \sum_i \sum_n b_i[n] \tilde{s}_n^i TW_i(t - (n - 1)T) \tag{6}$$

设用户 i_0 的特征码为 $(j_0, l_0, TW_{i_0}, S^{i_0})$, 从 (6) 式的混合信号中解出用户 i_0 的信息的过程可用图 2 来表示。图中的第 1 个框图的功能如图 1 所示, 第 2 个框图的功能由多级多子波分析滤波器及下采样来完成。判决框的功能是设置门限对解码后的信息进行判决。解码器的计算公式将在下面给出。

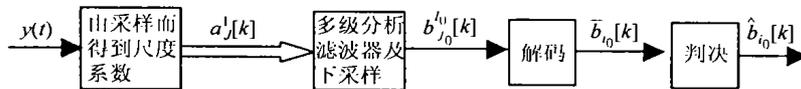


图 2 从混合信号中解出特征码为 $(j_0, l_0, TW_{i_0}, s^{i_0})$ 的用户信息过程

设混合信号 $y(t)$ 在空间 W_{j_0, l_0} 上的投影为 y_{j_0, l_0} , 则 $y_{j_0, l_0}(t) = \sum_i s_i(t)$, 其中 \sum 表示对所有 W_{j_0, l_0} 中的用户信号求和。当 $t \in [0, T]$ 时, 由 (5) 式和 (2) 式可得

$$y_{j_0, l_0}(t) = \sum_i b_i[1] \tilde{s}_1^i TW_i(t) = \sum_i b_i[1] \tilde{s}_1^i \sum_k c_k^i \psi_{j_0, k}^{l_0} = \sum_k \left[\sum_i b_i[1] \tilde{s}_1^i c_k^i \right] \psi_{j_0, k}^{l_0}$$

由多子波分析理论可知, $\sum_i b_i[1] \tilde{s}_1^i c_k^i \approx b_{j_0}^{i_0}[k]$ 。在等式两边乘以 $\tilde{s}_1^{i_0} c_k^{i_0}$ 并对 k 求和可得

$$b_{i_0}[1] \approx \tilde{s}_1^{i_0} \sum_k b_{j_0}^{i_0}[k] c_k^{i_0} \triangleq \bar{b}_{i_0}[1] \tag{7}$$

对 $\bar{b}_{i_0}[1]$ 进行判决就得到用户信息 $b_{i_0}[1]$ 的解调结果 $\hat{b}_{i_0}[1]$ 。 (7) 式给出了用户 i_0 在 $[0, T]$ 上信息的计算公式, 同时也表明了图 2 中解码框的工作原理。由于具有相同 j 和 l 的用户比系统的用户总数少得多, 所以 (7) 式大大地减少了解调的计算量。重复上述过程即可得出信息流估计 $\{\hat{b}_{i_0}[k]\}$ 。

4 理想信道情况下的仿真

在仿真中, 为了避免多子波的预处理过程, 我们对 GHM 多子波^[11]进行了平衡化处理。在第 1 个实验中, 仿真了一个总用户数为 480 的 MW-CDMA 系统, 图 3(a) 和 3(b) 分别给出了其中一个用户 (第 23 个用户) 的信息码元宽度的特征波形和长特征波形, 其中安全序列为

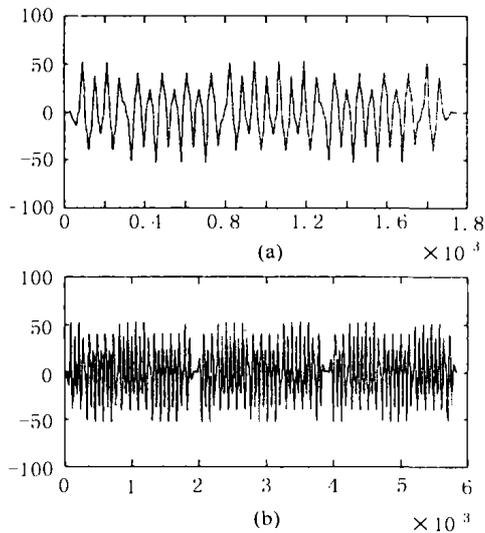


图3 用户特征波形 (a) 信息码元宽度的特征波形
(b) 安全序列为 $\{1, -1, -1\}$ 的长特征波形

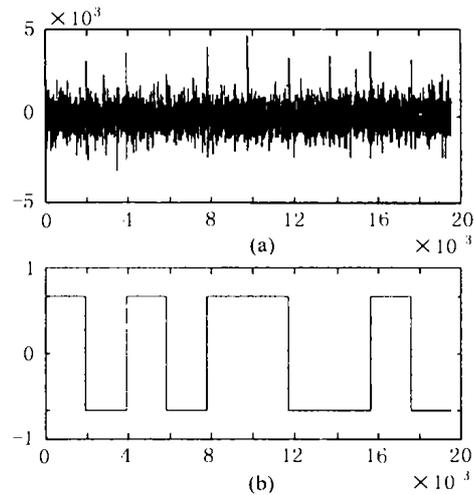


图4 (a) 只考虑多址干扰时接收端的混合信号
(b) 经滤波、解码和判决后所得到的重构信息

$[1, -1, -1]$ 。图4(a)是接收端所接收到的混合信号。图4(b)是经过滤波、解码和判决后得到的重构信息，重构的结果准确无误。

第2个实验中，我们从总用户集中随机产生了100个用户，每个用户随机发送10000 bit的信息。在所发射的 10^6 bit信息中，经接收端滤波、解码和判决再生后无一误码。这表明，由于用信号的采样值近似初始空间的尺度系数所产生的系统的固有噪声是可以忽略的。

5 抗白噪声干扰的分析与仿真

设图2中的 $y(t) = s(t) + n(t)$ ，其中 $s(t)$ 表示信号， $n(t)$ 为零均值白色噪声。经采样后得， $y[k] = s[k] + n[k]$ 。对于噪声 $n[k]$ ，设其对多级分析滤波器及下采样的输出为 $n_1[k]$ ，分别用 $P_n(\omega)$ 和 $P_{n_1}(\omega)$ 表示 $n[k]$ 和 $n_1[k]$ 的功率密度谱，则

$$P_{n_1}(\omega) = P_n(\omega)|H_{i_0}(\omega)|^2 \quad (8)$$

其中滤波器 $H_{i_0}(\omega)$ 表示向用户 i_0 的信号空间 W_{i_0} 上的投影。这表明，噪声中除 W_{i_0} 分量以外的所有分量均已被滤除。因此， $n_1[k]$ 的功率比 $n[k]$ 的功率要小得多。此外，由于 $n_1[k]$ 是由 $n[k]$ 经过多次线性滤波和下采样所得到的，所以仍是零均值的。由于解码器对于希望用户具有能量归一的作用，而对于噪声却有平均的作用。所以经解码后，噪声 $n_1[k]$ 对期望用户信号的干扰得到了进一步的抑制。仿真结果表明，当信噪比为 -5dB 时，误码率为 10^{-4} 量级，信噪比为 0dB 时，误码率为 10^{-6} 量级。

6 结 论

理论分析和实验结果均表明，这种多址系统具有较好的抗多址干扰和抗环境噪声的性能，可以重复使用特征码，并为减少解调计算量提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] S. Verdú, Multiuser Detection, Cambridge, U K, Cambridge Univ. Press, 1998, Chapter 4~Chapter7.
- [2] G. Woodward, B. S. Vuctic, Adaptive detection for DS-CDMA, Proc. IEEE, 1998, 86(7), 1413-1433.
- [3] X. Wang, H. V. Poor. Blind joint equalization and multiuser detection for DS-CDMA in unknown correlated noise, IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Processing, 1999, CAS-II-46(7), 886-895.
- [4] A. Duel-Hallen, A family of multiuser decision-feedback detectors for synchronous code-division multiple access channel, IEEE Trans. on Commun., 1995, COM-43(2/3/4), 421-434.
- [5] A. N. Akansu, P. Duhamel, X. Lin, Marc de Courville, Orthogonal transmultiplexers in communication: A review, IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, SP-46(4), 979-995.
- [6] Q. Jiang, Orthogonal multiwavelets with optimum time-frequency resolution, IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, SP-46(4), 830-844.
- [7] J. Pan, L. Jiao, L. Chen, Construction of orthogonal multiwavelets with short sequence via genetic algorithm, Progress in Natural Science, 2000, 10(4), 294-301.
- [8] X. G. Xia, A new prefilter design for discrete multiwavelet transforms, IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, SP-46(6), 1558-1570.
- [9] X. Yang, L. Jiao, J. Pan, Prefilter for multiwavelet neural network, Progress in Natural Science, 2000, 10(10), 780-786.
- [10] J. Lebrun, M. Vetterli, Balanced multiwavelets theory and design, IEEE Trans. on Signal Processing, 1998, SP-46(4), 1119-1125.
- [11] J. S. Geronimo, D. P. Hardin, P. R. Massopust. Fractal functions and wavelet expansions based on several scaling functions, Journal of Approximation Theory, 1994, 78(3), 373-401.

CDMA SYSTEM BASED ON MULTIWAVELET

Pan Jin* ** Jiao Licheng* Fang Yangwang*

**(Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)*

*** (Dept. of Computer and Information Eng., Xi'an Comm. Institute, Xi'an 710106, China)*

Abstract A MultiWavelet-based Code-Division Multiple-Access (MW-CDMA) scheme is presented based on the application of recent results in multiwavelet analysis filter, preprocessing and balancing to communications area. In MW-CDMA, at first, the received signal is decomposed into the components in the orthogonal wavelet spaces, and then the multiuser demodulation is implemented in each wavelet space. Theoretical analyses and experimental results show that MW-CDMA systems suppress multiple-access interference and ambient noise well. Moreover, the scheme gives a new guideline of thought to reduce the computation for demodulating.

Key words CDMA, Multiwavelet, Balance, Analysis filter

潘 进: 男, 1959 年生, 副教授, 博士生, 研究方向为子波、神经网络、通信信号处理。

焦李成: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为神经网络、非线性理论、智能信息处理等。

方洋旺: 男, 1966 年生, 副教授, 博士, 研究方向为非线性控制系统、鲁棒控制、通信信号处理等。