第5卷第1期　　空军工程大学学报(自然科学版)　　Vol.5 No.1
2004年2月　　JOURNAL OF AIR FORCE ENGINEERING UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE EDITION)　　Feb.2004

多用户DS-CDMA系统接收机载波频偏的有效估计方法

李栓红，　梁　俊，　李雪娇
(空军工程大学 电讯工程学院，陕西 西安　710077)

摘　要:多用户DS-CDMA系统中用户检测器存在小残差载波频偏,在对接收机模型分析基础上,给出一种基于通用特征值问题的有效估计载波频偏的方法。仿真结果表明该方法不但有效可行,同时还可估算出多用户DS-CDMA系统的信道响应。

关键词:载波频偏;特征系统;子空间;估计
中图分类号:TN911　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-3516(2004)01-0052-03

多用户载波检测器由于能很好解决DS-CDMA系统中存在的“远-近”问题,同时改善系统的性能,因而在DS-CDMA系统中得到广泛应用。当考虑一个无线系统通信时,接收信号都会受到多径衰落的影响,由于多普勒效应,载波会有小范围偏移。因此,估算载波偏移在DS-CDMA中对接收机来说非常重要。在实际接收系统中,对接收信号下变频后总是存在一小残差载波偏移。而且,对一个多用户载波方案来说,各用户因使用独立的发射机,接收端的载波偏移各不相同。因此,在接收机中,应对不同用户载波偏移作不同的校正。对载波偏移估算的算法很多,如文献[1]提出一种基于子空间算法来估算偏移。这种算法通过对发射机特征多项式基于LMS算法求解,所得的根即为载波偏移。但这种算法需对多维矩阵进行求递运算,计算起来十分复杂,而且信道响应估值是建立在载波偏移估值的基础之上的,所以载波估值的误差将会叠加到信道响应估值中,从而降低了系统的性能。本文提出一种简化方法,通过将文献[1]中非线性优化问题的求解转化为一小矩阵(甚至可以是稀疏矩阵)的线性标准特征值的求解,大大降低了计算的复杂性。

1　接收机模型

根据文献[1],P个用户伪同步CDMA系统的接收信号的离散时间模型可表示如下:

$$Y(k)=\sum_{i=1}^{P}S_i(k)e^{j(kM+L-2)\phi_i}Z_iC_ih_i+n(k) \tag{1}$$

式中:$S_i(k)$为载波信号承载信息矢量,φ_i为载波偏移,L为多径信道路径数,M为传输增益。

$\boldsymbol{h}_i=[h_i(0)h_i(1)\cdots h_i(L-1)]^{\mathrm{T}}$为第$i$个用户的FIR信道矢量;

$\boldsymbol{Z}_i=\mathrm{diag}(e^{j\varphi_{i1}},\cdots,e^{j\varphi_{i2}},e^{j\varphi_{ik}})$;

$$\boldsymbol{C}_i=\begin{bmatrix}C_i(L-1) & C_i(L-2) & \cdots & C_i(0)\\ C_i(L) & C_i(L-1) & \cdots & C_i(1)\\ \cdot & & & \\ C_i(M-1) & C_i(M-2) & \cdots & C_i(k-1)\end{bmatrix}$$为传输码字序列。

从式(1)可看出:在未知发送信息的情况下,利用解卷积的方法通过接收数据估计载波偏移$\{\varphi_i\}_{i=1}^{P}$,并同时得出信道响应$\{h_i\}_{i=1}^{P}$,从而得到发送信息。

收稿日期:2003-07-23
作者简介:李栓红(1973-),男,陕西岐山人,讲师,主要从事无线通信研究.

2 改进算法

当不考虑噪声污染时,可将式(1)改写为

$$Y = [y(0),(y(1),\cdots y(N-1))] = WS \tag{2}$$

其中 $W=[w_1,w_2,\cdots,w_p]$　$w_i = z_i c_i h_i$

$$S = \begin{bmatrix} S_1(0)e^{j\theta_1(0)} & S_1(1)e^{j\theta_1(0)} & \cdots & S_1(N-1)e^{j\theta_1(N-1)} \\ \\ S_p(0)e^{j\theta_p(0)} & S_p(1)e^{j\theta_p(1)} & \cdots & S_p(N-1)e^{j\theta_p(N-1)} \end{bmatrix}$$

$\theta(k) = (kM+L-2)\phi_i, k=0,1,\cdots,N-1$。对式(2)进行奇异值分解(SVD)可得:

$$U_0^{\mathrm{H}} z_i c_i h_i = 0 \qquad i=1,2,\cdots,p \tag{3}$$

其中,U_0 是 $K\times(k-p)$ 维的噪声子空间,且 $k-p>L$。考虑到实际情况中,接收信号受到噪声污染,故而对(3)式作相应处理,将矢量 $z_i c_i h_i$ 在噪声子空间上求2范数。即可得到代价函数为

$$J(\phi_i,h_i) = \| U_0^{\mathrm{H}} z_i c_i h_i \|^2 \tag{4}$$

则每一信道和载波频偏估计即为求代价函数的最小范数解。

$$\hat{\phi}_i,\hat{h}_i = \arg\min_{\phi_i,h_i} \| U_0^{\mathrm{H}} z_i c_i h_i \|^2 \tag{5}$$

将 z_i 用泰勒级数展开为:

$$z_i = I + j\phi_i D + \frac{(j\phi_i)^2}{2}D^2 + \cdots + \frac{(j\phi_i)^n}{n!}D^n = I + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{(j\phi_i)^n}{n!}D^n$$

$D = \mathrm{diag}(1,2,3,\cdots,k)$

由于实际中 ϕ_i 很小($|\phi_i|\ll 1$,可参考文献[1]),k 是一有限整数。故而 z_i 可用泰勒截断序列来代替。先用一阶泰勒序列逼近,即:

$$z_i = I + j\phi_i D \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)得

$$\begin{aligned} J(\phi_i,h_i) &= \| U_0^{\mathrm{H}} c_i h_i + j\phi_i U_0^{\mathrm{H}} D c_i h_i \|^2 \\ &= h_i^{\mathrm{H}} A_i^{\mathrm{H}} A_i h_i + j\phi_i h_i^{\mathrm{H}}(A_i^{\mathrm{H}} B_i - B_i^{\mathrm{H}} A_i) h_i + \phi_i^2 h_i^{\mathrm{H}} B_i^{\mathrm{H}} B_i h_i \end{aligned} \tag{7}$$

其中,$A_i = U_0^{\mathrm{H}} c_i$,$B_i = U_0^{\mathrm{H}} D c_i$ h_i 和 ϕ_i 的求解可转化为(7)式求极值,即:

$$\frac{\partial J(\phi_i,h_i)}{\partial h_i^{*}} = A_i^{\mathrm{H}} A_i h_i + j\phi_i(A_i^{\mathrm{H}} B_i - B_i^{H} A_i) h_i + \phi_i^2 h_i^{\mathrm{H}} B_i^{\mathrm{H}} B_i h_i = 0 \tag{8}$$

令 $\Gamma_i = A_i^{\mathrm{H}} A_i + j\phi_i(A_i^{\mathrm{H}} B_i - B_i^{\mathrm{H}} A_i) + \phi_i^2 B_i^{\mathrm{H}} B_i$,式(8)是一个关于 ϕ_i 的非线性多维矩阵,除了平凡解(即系统响应 $h_i = 0$),要使式(8)有解,需要 $\det(\Gamma_i)=0$。一般情况下(估计频偏不等于真正的载波频偏),式(8)要有唯一非零解,Γ_i 必须是满秩的。引入一附加未知特征矢量 g_i,将式(8)转变为一个等价的线性特征值的求解问题,即:

$$\begin{bmatrix} O_{L\times L} & I_{L\times L} \\ -(B_i^{\mathrm{H}} B_i)^{-1} A_i^{\mathrm{H}} A_i & -j(B_i^{\mathrm{H}} B_i)^{-1}(A_i^{\mathrm{H}} B_i - B_i^{\mathrm{H}} A_i) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_i \\ g_i \end{bmatrix} = \phi_i \begin{bmatrix} h_i \\ g_i \end{bmatrix} \tag{9}$$

假设 c_i 是满秩的(秩为 L),则 B_i 也是满秩的,即矩阵 $(B_i^{\mathrm{H}} B_i)^{-1}$($L\times L$ 维)存在,通常,L 很小,因此,逆矩阵的复杂性较低,容易看出,式(9),变成了一个标准的 $2L\times 2L$ 维的特征值问题的求解。小 L 值大大降低了计算量。用文献[2~3]中的方法解式(9)可同时得到 h_i 和 ϕ_i。h_i 可从最小特征矢量 $[h_i^{\mathrm{T}} g_i^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 截断而得,相应的最小特征值即为 ϕ_i。在解式(9)时,对特征矢量 $[h_i^{\mathrm{T}} g_i^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 作标准单位化。当考虑到用高阶(r 阶)泰勒序列逼近 z_i,利用文献[2]可将式(9)推广为线性 $2rL\times 2rL$ 维特征系统的求解,同时解出 h_i 和 ϕ_i。

$$\begin{bmatrix} O_{L\times L} & I_{L\times L} & \cdots & O_{L\times L} \\ O_{L\times L} & O_{L\times L} & \cdots & O_{L\times L} \\ \\ -E_{i,2r}^{-1}E_{i,0} & -E_{i,2r}^{-1}E_{i,1} & \cdots & -E_{i\,2r}^{-1}E_{i,2r-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h_i \\ g_i \end{bmatrix} = \phi_i \begin{bmatrix} h_i \\ g_i \end{bmatrix} \tag{10}$$

令 $F = U_0^H \tilde{D}^r C_i / 2^r r!$ ，则 $E_{i,2r} = F^H F$

因此，改进算法流程如下：

1)通过奇异分解或特征值分解计算噪声子空间 U_0；

2)对每一用户，用式(10)构建一个 $2rL \times 2rL$ 矩阵；

3)计算较小特征矢量和相应的特征值，即得到载波偏移 ϕ_i(对应特征值)；

4)对较小特征矢量进行截断和将其模值标准化为 1，从而得到系统响应 h_i。

3 仿真结果

将这种方法用在一个 DS－CDMA 系统中，$P = 10$，$M = 32$，采用 BPSK 调制，对所有用户它的多通路信道长度 L 均为 3，为了便于比较，分别用文献[1]的方法和本文方法(用三阶泰勒逼近)来估算载波偏移 ϕ_i 和系统响应 h_i，得到误比特率(BER)与信噪比(SNR)的坐标图像如图 1 所示。本文提出的方法，由于构建的式(10)是一个稀疏矩阵，故计算量小，复杂度低，从图中可看出，用文中三阶泰勒逼近，所得结果更接近实际情况。且对载波偏移 ϕ_i 和系统响应 h_i 两种参数的估计通过解特征系统方程式(10)一步得出，估算误差相互不影响。

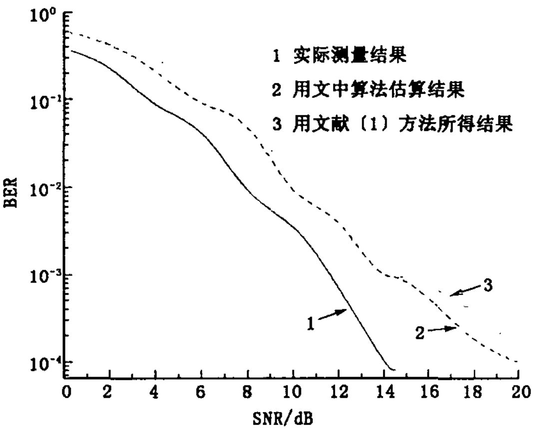

图 1　系统误比特率——信噪比测量图

参考文献：

[1] Li K, Liu H. Joint Channel and Carrier Offset Estimation in CDMA Communication[J]. IEEE Trans, 1999, (47): 1811－1822.

[2] Wilkinson J H. The Algebraic Eigenvalue Problem [M]. New York: Oxford Univ Press, 1965.

[3] Golub G H, Van L F Loan. Matrix Compututions[M]. Baltimore MD: Johns Hopkins Univ Press, 1996.

(编辑：门向生)

An Efficient Estimation Method of Carrier Offset in Multi－user DS － CDMA System

LI Shuan－hong,　LIANG Jun,　LI Xue－jiao

(The Communication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: In Multi－user DS － CDMA system user detectors produce a small residual carrier offset, based on the analysis of the receiver's model, an efficient estimation method of carrier offset is presented. Simulations on computer show that the method is effective, feasible and can be used to estimate the channel's response in DS － CDMA.

Key words: carrier offset; characteristic system; sub－space; estimation