

一种 CDMA 接收机在单频点阻塞干扰环境中的性能分析¹

唐友喜 雷 鸣 查光明 黄顺吉

(电子科技大学抗干扰通信国家重点实验室 成都 610054)

摘 要 本文考虑同步码分多址通信系统在单频点阻塞干扰环境中, 一种抗多址干扰单用户检测接收机 (I. Acar 等人 1994 年提出) 的误码率特性。结果表明, 这种接收机 (A-T 接收机) 在系统用户数很大时仍具有良好的抗单频点阻塞干扰性能。

关键词 CDMA 通信系统, 最佳多用户接收机, 准最佳多用户接收机, 单频点阻塞干扰, 误码率

中图分类号 TN911, TN919

1 引 言

近年来, 码分多址 (CDMA) 通信系统的抗多址干扰优化问题得到了许多仔细的研究^[1-6]。文献 [2] 中的最佳多用户检测接收机由 K 个匹配滤波器及其后的 Viterbi 算法组成, 其中 K 为系统内用户数, 该算法的复杂程度随着 K 的增长而指数增加, 准最佳多用户检测接收机^[3,4]的算法复杂程度随 K 而线性增长。最佳和准最佳多用户检测接收机能最优化或准最优化的抗多址干扰, 从而使系统用户容量极大化。由于需要基站和用户间的通信来传递控制信息, 采用功率控制抗多址干扰的 CDMA 系统被认为是一种失败的方法^[4]。最佳和准最佳接收机都要求每个接收机预先知道系统内其它所有接收机的特征波形 (signature waveform), 这在实用中绝大多数满足不了安全的需要。文献 [5] 中的抗多址干扰单用户检测接收机知道其它接收机的部分特征码信息, 但这种接收机十分复杂。文献 [6] 中的色噪声 (白高斯噪声加多址干扰) 环境中的优化接收机通过对色噪声的估计来抗多址干扰, 它也很复杂。在文献 [1] 中, 由 Acar 和 Tantarana 提出了一种线性单用户检测接收机, 它既能抗多址干扰, 且算法复杂程度与传统的单用户检测最佳接收机一样; 为了方便起见, 我们称其为 A-T 接收机。由于 A-T 接收机的解调序列不同于传统 CDMA 接收机的特征序列, 它的抗阻塞干扰性能如何, 是一个很有意义的工作, 且相关文献中未见报道。本文分析在连续波单频点阻塞干扰环境中 A-T 接收机的性能。

2 系统模型

没有阻塞干扰的系统模型已在文献 [1] 中给出。单频点阻塞干扰下的系统模型如图 1 所示。

对于一个 PSK 调制的同步 CDMA 通信系统, 第 k 个发射机在 $[0, T]$ 内的发射信号为

$$S_k(t) = A_k b_k a_k(t) \cos \omega_c t, \quad (1)$$

¹ 1995-12-11 收到, 1996-08-06 定稿
邮电部重点科技攻关项目资助课题

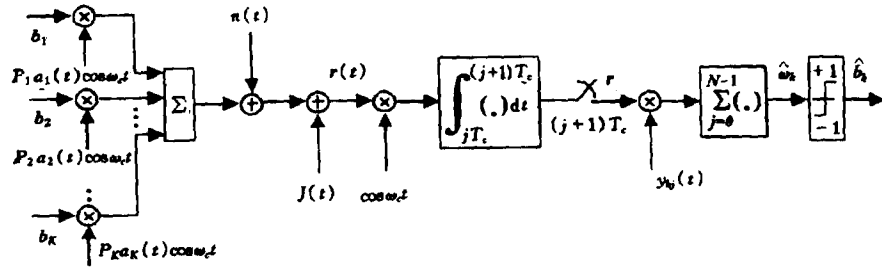


图 1

其中 A_k 为第 k 个发射机发射信号幅度, $A_k \geq 0$; $b_k \in \{+1, -1\}$ 是第 k 个用户的数据, 其持续时间为 T ; ω_c 为载波频率; $a_k(t)$ 为第 k 个用户的特征波形

$$a_k(t) = \sum_{j=0}^{N-1} c_{kj} \varphi(t - jT_c), \quad (2)$$

其中矢量 $\mathbf{c}_k = (c_{k,0}, \dots, c_{k,N-1})^T$ 为第 k 个用户的特征序列。 $c_{k,j} \in \{+1, -1\}$ 对于 $1 \leq k \leq K$, $0 \leq j \leq N-1$ 。 $a_k(t) = 0$ 对 $t \notin [0, T]$ 。 $\varphi(t)$ 是一个脉宽为 $T_c = T/N$ 的单位矩形脉冲, 其中 N 为特征序列的长度。 K 为系统设计的用户数。

第 k 个用户在 $[0, T]$ 内接收到的信号为

$$r(t) = \sum_{k=1}^K S_k(t) + J(t) + n(t), \quad (3)$$

其中 $n(t)$ 为一双边谱密度为 $N_0/2$ 的白高斯过程, $J(t)$ 为干扰信号

$$J(t) = \sqrt{2J} \cos(\pi f t + \theta), \quad (4)$$

其中 J, f, θ 分别为干扰的功率, 频率和相位, θ 在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布。

3 误码率计算

第 k 个用户接收到的信号与载波相乘, 通过积分器, 再以 $1/T_c$ 速率抽样, 这个过程将连续信号 $r(t)$ 转换成 N 维矢量 $\mathbf{r} = (r_0, r_1, \dots, r_{N-1})^T$

$$\mathbf{r} = \frac{T_c}{2} \sum_{k=1}^K A_k b_k \mathbf{c}_k + \mathbf{J} + \mathbf{n}, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{n} = (n_0, \dots, n_{N-1})^T$ 是一零均值, 协方差为 $N_0 T_c I/4$ 的高斯随机矢量; $\mathbf{J} = (J_0, \dots, J_{N-1})^T$, 其中

$$J_j = \int_{jT_c}^{(j+1)T_c} J(t) \cos \omega_c t dt = \sqrt{J/2} T_c \text{sinc}(\pi \Delta f T_c) \cos[\pi \Delta f (2j+1) T_c + \theta]. \quad (6)$$

上面第二个公式利用了干扰频率与载波率和的分量积分为零。 (6) 式中 $\Delta f = f - f_c$, $\omega_c = 2\pi f_c$; $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。

类似于文献 [1], 定义 $w = (w_1, \dots, w_K)^T$ 其中 $w_k = A_k b_k T_c / 2$, w 的最大似然估计为 $\hat{w} = (\hat{w}_1, \dots, \hat{w}_K)^T$. 根据文献 [1] 有

$$\hat{w} = H^{-1} C r = w + H^{-1} C J + H^{-1} C n, \quad (7)$$

其中 C 为 $K \times N$ 阶矩阵, 其第 i 行为 c_i^T ; H 为正定 $K \times K$ 阶互相关矩阵, $H = C C^T$.

对第 k 个 A-T 接收机有

$$\hat{w}_k = \frac{1}{2} T_c A_k b_k + y_k^T J + y_k^T n, \quad (8)$$

其中 y_k^T 为 $H^{-1} C$ 的第 k 行. 容易推得 $y_k^T n$ 是一零均值、方差为 $N_0 T_c \eta_{kk} / 4$ 的高斯随机变量, 其中 η_{kk} 为 H^{-1} 的第 k 个主对角线元素. 令 $g = y_k^T J$, 则

$$\begin{aligned} g &= \sum_{j=0}^{N-1} y_{k,j} \sqrt{J/2T_c} \text{sinc}(\pi \Delta f T_c) \cos[\pi \Delta f (2j+1) T_c + \theta] \\ &= \sqrt{J/2T_c} \text{sinc}(\pi \Delta f T_c) \sqrt{u^2 + v^2} \cos(\theta + \beta), \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$u = \sum_{j=0}^{N-1} y_{k,j} \cos[\pi \Delta f (2j+1) T_c], \quad (10)$$

$$v = \sum_{j=0}^{N-1} y_{k,j} \sin[\pi \Delta f (2j+1) T_c], \quad (11)$$

$$\text{tg} \beta = v/u. \quad (12)$$

3.1 $u^2 + v^2$ 的讨论

为研究 (9) 式干扰的幅度值, 下面讨论 $u^2 + v^2$ 的特性. 由 (10) 式

$$\begin{aligned} u^2 &= \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} y_{k,j} \cos[\pi \Delta f (2j+1) T_c] \right\} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,i} \cos[\pi \Delta f (2i+1) T_c] \right\} \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,j} y_{k,i} \cos[\pi \Delta f (2j+1) T_c] \cos[\pi \Delta f (2i+1) T_c]. \end{aligned} \quad (13)$$

同理可得

$$v^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,j} y_{k,i} \sin[\pi \Delta f (2j+1) T_c] \sin[\pi \Delta f (2i+1) T_c]. \quad (14)$$

联合 (13), (14) 式可得

$$u^2 + v^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} y_{k,j} y_{k,i} \cos[2\pi \Delta f (j-i) T_c] = \sum_{i=1-N}^{N-1} y_k(i) \cos(2\pi \Delta f i T_c), \quad (15)$$

其中 $y_k(i)$ 为 y_k 的非周期自相关函数^[7]

$$y_k(i) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-1-i} y_{k,j} y_{k,i+j}, & 0 \leq i \leq N-1; \\ \sum_{j=0}^{N-1+i} y_{k,j} y_{k,j-i}, & 1-N \leq i < 0; \\ 0, & \text{其它.} \end{cases} \quad (16)$$

因 y_k^T 为 $H^{-1}C$ 的第 k 行, 设 H^{-1} 的第 ij 个元素为 h_{ij} , 则当 $0 \leq i \leq N-1$ 时,

$$y_k(i) = \sum_{j=0}^{N-1-i} \left(\sum_{m=1}^K h_{km} c_{m,j} \right) \left(\sum_{n=1}^K h_{kn} c_{n,j+i} \right) = \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^K h_{km} h_{kn} c_{m,n}(i), \quad (17)$$

其中 $c_{m,n}(i)$ 为 c_m 与 c_n 的非周期互相关系数. 同理可得到 $1-N \leq i < 0$ 时 $y_k(i)$ 的表达式同 (17) 式. 联合 (15), (16) 和 (17) 式, 有

$$u^2 + v^2 = \sum_{i=1-N}^{N-1} \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^K h_{km} h_{kn} c_{m,n}(i) \cos(2\pi \Delta f i T_c). \quad (18)$$

3.2 误码率计算

设定 b_k 等于 1 和 -1 的概率相等, 考虑到 (8) 式, b_k 的差错概率为

$$P_{e,k} = P(\hat{b}_k = 1 | b_k = -1) = P(-T_c A_k / 2 + y_k^T J + y_k^T n > 0). \quad (19)$$

在 $g = y_k^T J$ 已知的情况下, (19) 式条件差错概率 $P_{e,k}(g)$ 为

$$P_{e,k}(g) = Q[\sqrt{A_k^2 T_c / (\eta_{kk} N_0)} (1 - g')], \quad (20)$$

其中 $Q(x) = 1/\sqrt{2\pi} \int_x^{+\infty} \exp(-t^2/2) dt$, g' 为

$$g' = \sqrt{2J/A_k^2} \text{sinc}(\pi \Delta f T_c) \sqrt{u^2 + v^2} \cos(\theta + \beta). \quad (21)$$

(20) 式为条件概率, 非条件差错概率为

$$P_{e,k} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{g'}(x) Q\left[\sqrt{A_k^2 T_c / (\eta_{kk} N_0)} (1 - x)\right] dx, \quad (22)$$

其中 $f_{g'}(x)$ 为 g' 的分布密度函数^[8,9]:

$$f_{g'}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \Gamma [1 - (x/\Gamma)^2]^{1/2}}, & |x| < \Gamma; \\ 0, & \text{其它;} \end{cases} \quad (23)$$

其中

$$\Gamma = \left| \sqrt{2j/A_k^2} \text{sinc}(\Delta f \pi T_c) \sqrt{u^2 + v^2} \right|. \quad (24)$$

(22) 式中 H^{-1} 的第 k 个主对角线元素 η_{kk} 的上下界为^[1]

$$1/N \leq \eta_{kk} \leq [N - (K - 2)\theta] / \{(N + \theta)[N - (K - 1)\theta]\}, \quad (25)$$

其中 θ 为 H 的非主对角线元素中的绝对值最大者。

4 数值结果和讨论

图 2、图 3 示出了误码率与信噪比、用户数目 (K)、干信比 ($2J/A_k^2$) 的关系曲线。其中特征序列取长度 $N = 127$ 的 Gold 码, 干扰频率与载波频率相同 ($\Delta f = 0$), (22) 式误码率中的 η_{kk} 取 (25) 式的上界, Gold 码间的互相关系数取 -1 。

从图 2 可看出一个非常有趣的特性。干信比为 15dB 时, 当系统设计用户数 K 由 1 增加到 14, 误码率最大上升不到二个数量级。而当 $K = 1$ 时, 图 1 所示模型即为传统单用户最佳接收机, (21) 式阻塞干扰对误码率影响表达式也同传统单用户最佳接收机的相同^[9]。因此 A-T 接收机有近似于传统单用户最佳接收机的抗单频阻塞干扰性能!

图 3 示出了误码率与干信比和信噪比的关系, 其中 K 取 10, 由图可看出, 随干信比的增加, 误码率上升。

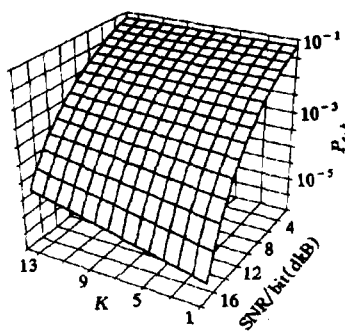


图 2

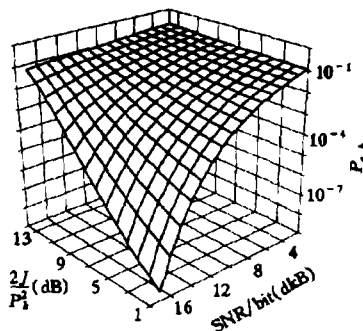


图 3

5 结 论

本文分析了 A-T 接收机的抗单频点阻塞干扰性能。结果表明, A-T 接收机仍具有抗单频点阻塞干扰性能。对于特征码采用 Gold 码的系统, A-T 接收机具有十分良好的抗单频阻塞干扰能力。

参 考 文 献

- [1] Acar I, Tantarana S. A linear receiver for synchronous CDMA channels, IEEE MILCOM'94, 1994, 579-582.
- [2] Verdu S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels, IEEE Trans. on IT, 1986, IT-32(1): 85-96.
- [3] Lupas R, Verdu S. Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple access channels, IEEE Trans, on IT, 1989, IT-35(1): 123-136.
- [4] Varanasi M K, Aazhang B. Optimally near-far resistant multiuser detection in differentially coherent synchronous channels, IEEE Trans. on IT, 1991, IT-37(4): 1006-1018.

- [5] Poor H V, Verdu S. Single-user detectors for multiuser channels, IEEE Trans. on COM, 1988, COM-36(1): 50-60.
- [6] Davis M E, Milstein L B. Improved CDMA performance through multiple access noise rejection, IEEE MILCOM'92, 1992, Paper 36.2.
- [7] Sarwate D V, Pursley M B. Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequence, Proc. IEEE, 1980, 68(5): 593-619.
- [8] Milstein L B, Davidovici S, Schilling D L. The effect of multiple-tone interfering signals on a direct sequence spread spectrum communication system, IEEE Trans. on COM, 1982, COM-30(3): 436-446.
- [9] Nazari N, Ziemer R E. Computationally efficient bounds for the performance of direct-sequence spread spectrum multiple-access communication systems in jamming environments, IEEE Trans. on COM, 1988, COM-36(5): 577-587.

THE PERFORMANCE OF A CDMA RECEIVER IN THE TONE JAMMING ENVIRONMENT

Tang Youxi Lei Ming Cha Guangming Huang Shunji

*(National Defence Key Anti-interference Communication Lab., University of Electronic
Science and Technology of China, Chengdu 610054)*

Abstract A synchronous CDMA communication system in a tone jamming environment is considered. The bit error rate of an anti-multiple-access interference receiver using the single-user detector is given. The receiver (A-T receiver) is of good performance of anti-interference when there are many active users in the system.

Key words CDMA communication system, Optimum multi-user demodulator receiver, Suboptimum multi-user demodulator receiver, Tone jam, Bit error rate

唐友喜: 男, 1964 年生, 博士研究生, 从事 CDMA 通信系统研究.

雷 鸣: 男, 1964 年生, 讲师, 博士研究生, 从事扩频、数字通信等研究.

查光明: 男, 1937 年生, 教授, 从事扩频、数字通信等的研究.

黄顺吉: 男, 1933 年生, 教授, 博士生导师, 从事雷达信号处理、GPS 等的研究.