

IS-95A CDMA 通信系统中一种新的信号 多速率检测算法

樊平毅¹, 夏香根²

(1. 清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室, 北京 100084; 2. 美国特拉华大学电机与计算机工程系, 美国)

摘要: 信息多速率传输和检测是现代和未来数字通信系统设计的主要特征之一. 在 IS-95 A 系统中, 采用了四种不同的速率传输语音信息, 速率的选择采用语音激活方式. 在接收端, 为了简化设备复杂度, 降低能耗, 需要确定信息的传输速率, 以便可以正确的译码. 最近, 文[3]提出一种有效的多速率检测算法. 本文提出一种新的多速率检测算法, 与文[3]的算法相比, 计算复杂度相当, 但在低信噪比的情况下, 速率误检概率的整体性能有较大的提高.

关键词: 多速率检测; IS-95; 码分多址; 信噪比

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 04-0471-04

A New Multi-Rate Detection Algorithm for IS-95A CDMA System

FAN Ping-yi¹, XIA Xiang-gen²

(1. The State Key Lab. on Microwave and Digital Communication, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware U. S. A., U. S. A.)

Abstract: Information transmission and detection with different rates are one of the main characteristics in the current and future digital communication systems. In IS-95 A CDMA system, the speech encoder has four different rates depending on the speech activities of the speaker. At the receiver, in order to reduce the complexity of the decoder and save the energy, it needs to detect which rate is used, so that it can select one matched decoder to deal with the transmitted signals. In [3], an effective multi-rate detection algorithm was presented recently. In this paper, a new multi-rate detection algorithm is proposed. Compared with that in [3], the proposed algorithm in this paper has comparable computation complexity and a considerable improvement on the total performance of the error rate detection probability under relatively low signal to noise ratios.

Key words: multi-rate detection; IS-95; CDMA; signal to noise ratio

1 引言

在现在和未来的数字通信系统设计中, 信息多速率传输是其一重要的特征, 这是由于多用户多媒体信息传输发展的需要. 例如, 现在的北美数字蜂窝通信标准 TIA/EIA/IS-95 A 中, 它规定在前向连接中 (从基站到移动用户的传输) 采用了四种不同的语音信号传输速率. 在发端, 信息速率的选择采用语音激活方式. 语音的编码速率是以帧为基础的, 也就是说, 在同一数据帧中, 传输的符号采用重发的方式, 以保证整个数据帧保持一定的符号率. 符号重发的次数由传输的信息速率决定. 而在不同的帧中, 数据速率可能是变化的. 最近, Cohen 和 Lou^[2] 提出了一种用于 IS-95A 系统的多速率检测算法, 其主要目的在于简化接收端设备的复杂度. 这是因为在传统的 IS-95A 系统中, 在接收端需设四个不同速率的维特比译码器, 分别对接收的信号进行并行译码, 然后再选择译码性能最好的输出. 这种后处理方式所需的能耗是相当大的. 为了简化接

收端的设备, 降低能耗, 接收端可采用软译码方式或选择其中一个速率匹配的维特比译码器进行译码. 基于这种考虑, 必需在接收端实现维特比译码前加入信号传输速率的预检测. 也就是说, 在接收端, 为了正确的解译接收到的信息, 需要正确的检测信息的传输速率. 在文献[2]的算法中没有给出明确的速率判定门限, 也缺乏理论性能分析. 在文献[3]中, 利用子波变换的方法, 提出一种混合的速率检测算法, 同时也给出了相应的理论分析. 它与文献[2]相比, 计算复杂度略有增加, 但误检的概率远低于文献[2]中的算法. 文献[2,3]中的主要的缺陷是对不同的信息传输速率, 误检的概率差别较大, 同时, 文献[3]中的算法, 速率的判定门限依赖于传输的信噪比, 对噪声的容忍性能较差.

在本文中, 我们提出一种新的信号多速率检测算法, 在高斯白噪声信道中, 速率判定门限是独立于信噪比的. 在算法复杂度方面, 这种新的算法和文[2]中的算法相比, 计算复杂度

略有增加. 与文[3]中的算法相比, 计算复杂度相当. 在信噪比较低的情况下, 新算法的整体性能优于文[3]中的算法, 并且对不同的信息传输速率, 误检的概率差别较小. 相应的理论分析和仿真结果证明了这种新算法的有效性和可行性.

2 多速率检测算法的提出

首先, 介绍 IS-95A 系统中的信号模型. 在 IS-95A 中, 四种不同的信息速率分别为 9.6 kbps, 4.8 kbps, 2.4 kbps, 1.2 kbps. 经过速率为 1/2 256 个状态的卷积编码器, 相应的数据速率分别为 19.2 kbps, 9.6 kbps, 4.8 kbps, 2.4 kbps, 然后符号进行重发, 以满足系统传输的符号速率达到 19.2 kbps. 相应的数据帧长为 384. 信号的调制方式采用 BPSK. 详细的发端框架结构参考图 1.

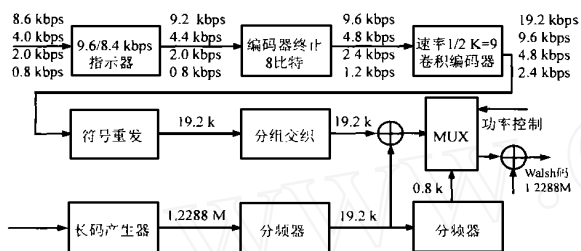


图 1 IS-95 A CDMA 系统前向连接发端框图

基于上述系统描述, 信号数学模型可以表述为

$$x(k2^j + l) = x(k2^j), 0 \leq l \leq 2^j - 1, 0 \leq k \leq N2^{-j} - 1 \quad (1)$$

其中: $J \in \{0, 1, 2, 3\}$, $N = 384$ (帧长); $x(n)$ 的取值为 $\{\pm 1\}$. 式 (1) 的结果是由于符号重发所致.

信号通过高斯白噪声信道, 在接收端得到的等价信号模型为

$$y(n) = x(n)e^{j\theta} + (n) \quad (2)$$

其中 (n) 为复的加性高斯白噪声, 其均值为 0, 方差为 N_0 , 为载波相位差.

多信号速率检测问题就是利用接收到的信号序列 $y(n)$, 如何确定参数 J 的值.

在文[3]中, 给出了如下的多速率检测算法.

第一步: 计算参数

$$t_j = \frac{\sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} |d_j(k)|^2}{N}, j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

其中 $d_j(k) = \sum_{l=0}^{2^j-1} \{y(2^j k + 2^j l + l) - y(2^j k + l)\}$.

第二步: 设定门限值 $T_j = N_0 + 1/2, j = 1, 2, 3$.

第三步: 如果当 $0 < j < J_0$ 时, 有 $t_j < T_j$, 并且 $t_{j_0} > T_{j_0}$, 则判定 $J = J_0 - 1$.

在上述算法中, 每帧需用 2154 次加法, 1248 次求绝对值平方, 3 次除法. 从上述算法中也可以看出, 信号速率的判定依赖于噪声的方差. 当噪声方差估计偏差较大时, 信号速率的误判的概率就会变大, 系统的性能会恶化, 甚至系统不能工作. 为了解决估计算法的抗噪稳健性, 在本文中, 提出如下的算法:

第一步: 计算

$$t_j = \frac{\sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} \text{Re}\{y(k2^j + p) y^*(k2^j + 2^{j-1} + p)\}}{N/2}, j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

其中: Re 表示取复数的实部运算, $*$ 表示取复共轭运算.

第二步: 设定判定门限 $T_j = 1/2$.

第三步: 如果 $t_1 < T_1$, 则判定 $J = 0$.

如果, 当 $0 < j < J_0 \leq R - 1$ 时, $t_j \geq T_j$, 并且 $t_{j_0} < T_{j_0}$, 则判定 $J = J_0 - 1$.

否则, 判定 $J = R$. 其中 $R = 3$.

上述算法中每帧用需要 $2(R - 1)(N/2 + 1) = 1158$ 次乘法和除法, $(R - 1)N = 1149$ 次加法. 算法复杂度主要取决于乘法和除法以及绝对值的平方 (乘法运算). 依据以上两种算法所需的运算次数可以看出, 本文的算法与文[3]中的算法相比复杂度略低, 可以说是基本相当的. 同时也可看出, 在此新算法中设定的判定门限是和噪声能量无关的, 即判定门限和系统的信噪比是独立的.

3 性能分析

在本节中, 将从理论上分析本文算法的性能. 首先, 讨论判定门限设计的合理性.

为了不失一般性, 假定传输的数据序列 $\{x(k2^j) | k = 0, 1, N2^{-j} - 1\}$ 是独立同分布的随机过程, 并且与噪声是互不相关的. 基于上述假设, 可知, 在给定信号的传输速率 J 的条件下, t_j 的均值为

$$E(t_j | J < j) = 0$$

$$E(t_j | j \geq J) = 1$$

因此, R 个门限值 T_j 应设定为 $1/2$. 从而可知, 在本文提出的算法中设定的门限是合理的.

下面分析本文提出的多速率检测算法的性能.

将式 (2) 代入式 (4) 得:

$$t_j = \frac{\sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} \text{Re}\{x(k2^j + p) x^*(k2^j + 2^{j-1} + p)\}}{N/2} + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} \text{Re}\{x(k2^j + p) e^{j\theta} x^*(k2^j + 2^{j-1} + p) + x^*(k2^j + 2^{j-1} + p) e^{-j\theta} (k2^j + p)\} + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} \text{Re}\{(k2^j + p) x^*(k2^j + 2^{j-1} + p)\} \quad (5)$$

如果传输的数据速率 $J \geq j$, 式 (5) 可以化为

$$t_j = \frac{\sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} |x(k2^j + p)|^2}{N/2} + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} \text{Re}\{x(k2^j + p) e^{j\theta} x^*(k2^j + 2^{j-1} + p) + x^*(k2^j + 2^{j-1} + p) e^{-j\theta} (k2^j + p)\} + \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N2^{-j}-1} \sum_{p=0}^{2^j-1} \text{Re}\{(k2^j + p) x^*(k2^j + 2^{j-1} + p)\} \quad (6)$$

在这种情况下, t_j 可以用均值为 1, 方差为 $\sigma^2 = \frac{N_0 + N_0^2/2}{N/2}$ 的高斯随机变量逼近. 特别, 当 $0 \leq j_1 < j_2 \leq J$ 时, t_{j_1} 和 t_{j_2} 的互相关系数 $\rho_{j_1 j_2}$ 为

$$i_1 i_2 = \frac{E\{(t_{j_1} - 1)(t_{j_2} - 1) | J \geq j_1, j_2 > 0\}}{\sqrt{E\{(t_{j_1} - 1)^2(t_{j_2} - 1)^2\}}} \frac{1}{1 + N_0/2} = \quad (7)$$

因此, $\{t_k\}_{k=1}^J$ 的条件联合概率分布为

$$p(t_1, t_2, \dots, t_j | J = j) = \frac{1}{(2\pi)^{j/2} (\det(M))^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{(t-m)^T M^{-1} (t-m)}{2} \right\} \quad (8)$$

其中: $m^T = \{1, 1, \dots, 1\}$ 是 $t^T = \{t_1, t_2, \dots, t_j\}$ 的均值向量; M 为 $J \times J$ 的互相关矩阵,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

M^{-1} 表示 M 的逆矩阵.

对固定的传输数据速率 J , 易知, 统计量 $t_j, j > J$ 和统计量 $t_{j_1}, j_1 \leq J$ 是互不相关的. 利用等效的高斯变量(指均值和方差相同的高斯变量)替代 t_j 和 t_{j_1} , 由高斯变量的性质可知, 统计量 t_j 和 t_{j_1} 是近似独立的.

下面讨论 $J = j$ 的情况, 首先, 定义一个参数;

$$u_j = \{k : x(k2^{j+1}) - x(k2^j), 0 \leq k \leq N2^{-(j+1)} - 1\} \quad (9)$$

其中 $| \{j} |$ 表示集合中 $\{j\}$ 元素的个数.

因此可得:

$$P_r(u_j = v | J = j) = \binom{N2^{-(j+1)}}{v} \frac{1}{2^{N2^{-(j+1)}}} \quad (10)$$

相应的误检概率为

$$P_r(t_{j+1} > T_{j+1} | J = j) = \sum_{v=0}^{N2^{-(j+1)}} P(t_{j+1} > T_{j+1} | J = j, u_j = v) \cdot p(u_j = v | J = j) \quad (11)$$

其中条件概率 $P(t_{j+1} > T_{j+1} | J = j, u_j = v)$, 可由下式计算得到:

$$P_r(t_{j+1} > T_{j+1} | J = j, u_j = v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{T_{j+1}}^{\infty} \exp \left\{ -\left[x - \frac{N2^{-(j+1)} - 2v}{N2^{-(j+1)}} \right]^2 / 2 \right\} dx \quad (12)$$

这是因为 t_{j+1} 的条件均值 $E(t_{j+1} | J = j, u_j = v) = \frac{N2^{-(j+1)} - 2v}{N2^{-(j+1)}}$, 方差为 2 .

将式(12)代入式(11), 得

$$P_r(t_{j+1} > T_{j+1} | J = j, u_j = v) = \frac{1}{2^{N2^{-(j+1)}} \sqrt{2\pi}} \sum_{v=0}^{N2^{-(j+1)}} \binom{N2^{-(j+1)}}{v} \exp \left\{ -\left[x - \frac{N2^{-(j+1)} - 2v}{N2^{-(j+1)}} \right]^2 / 2 \right\} dx \quad (13)$$

基于上述讨论, 不同速率的误检概率为

$$P_{error}(J = 0) = 1 - P_r(t_1 < T_1 | J = 0) = P_r(t_1 \geq T_1 | J = 0) \quad (14)$$

$$P_{error}(J = j) = 1 - P_r(t_{j+1} < T_{j+1} | J = j) \cdot P_r(t_1 \geq T_1, t_2 \geq T_2, \dots, t_j \geq T_j | J = j) \quad (15)$$

其中

$$P_r(t_1 \geq T_1, t_2 \geq T_2, \dots, t_j \geq T_j | J = j) = \int_{T_1}^{\infty} \int_{T_2}^{\infty} \dots \int_{T_j}^{\infty} p(t_1, t_2, \dots, t_j | J = j) dt_1 dt_2 \dots dt_j$$

$$P_r(t_{j+1} < T_{j+1} | J = j) = 1 - P_r(t_{j+1} \geq T_{j+1} | J = j)$$

值得注意的是: (1) 如果在接收端知道信噪比, 那么可以用上述的公式估计最优的判定门限使得误判的概率达到最小. (2) 如果在接收端先进行载波恢复, 那么本文的模型(2)可以简化为没有载波相差, 噪声部分只有实部. 此时文[3]的算法和本文的算法仍是有效的, 唯一的差别在于相应的信噪比增加了 3dB 增益.

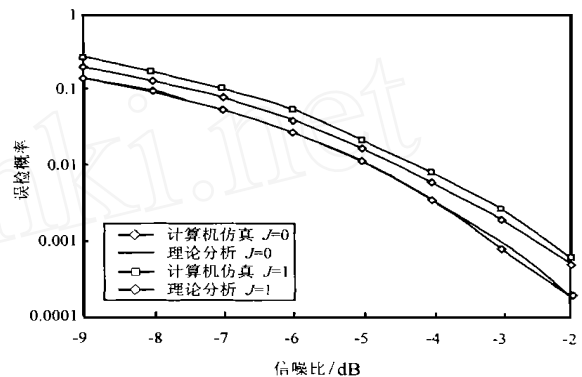


图 2 新算法关于第一、二种数据速率的误检概率的理论分析和计算机仿真结果

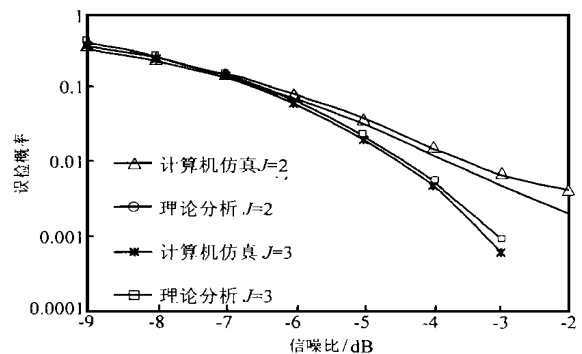


图 3 新算法关于第三、四种数据速率的误检概率的理论分析和计算机仿真结果

4 数值分析和计算机仿真

在本节中, 我们基于现行的北美 IS-95 A CDMA 系统中的标准, 对四种不同的数据速率进行了计算机仿真和数值分析, 其中参数 $N = 384$. 图 2 和图 3 给出了本文算法的理论分析和计算机仿真结果. 图 2 和图 3 表明理论分析的结果和计算机仿真的结果有很好的拟合性, 从而证明了理论分析的有效性. 为了与已有的算法相比, 文中选取文[3]的算法进行比较, 这是因为文[3]中已证实文[3]算法性能优于文[2]的算法. 图 4 给出了本文算法和文[3]中的算法的性能比较结果. 在图 4 中, 实线表示本文算法的计算机仿真结果, 点划线表示文[3]

中的算法的计算机仿真结果. 图 4 的结果表明本文的算法与文[3]中的算法相比, 在相同的信噪比下对不同的数据速率相应的误检概率相差较小. 特别在信噪比为 -3dB 时, 文[3]算法中, 速率 $J=1$ 的误检概率为 0.08% , $J=3$ 的误检概率为 20% , 它们相差两个数量级. 采用本文的算法, 在信噪比为 -3dB 时, 误检概率最大相差为一个数量级, 即 $J=2$ 时误检概率为 2% , $J=3$ 时误检概率为 0.1% . 图 5 给出了一种四种速率等概率统计平均的结果. 当误检概率为 2% 时, 本文的算法与文[3]算法相比可提供 2dB 的增益. 同时, 它也表明本文的算法在低信噪比的情况下, 整体性能优于文[3]中的算法.

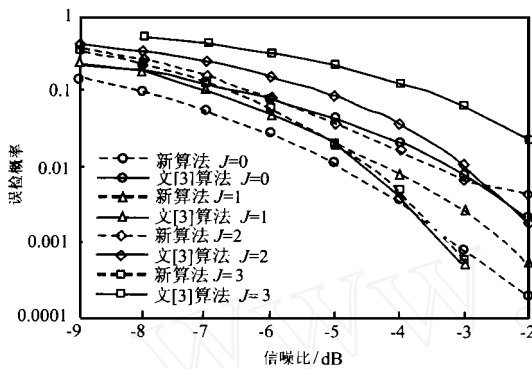


图 4 关于不同话音速率的情况, 新算法与文[3]中的算法的性能比较

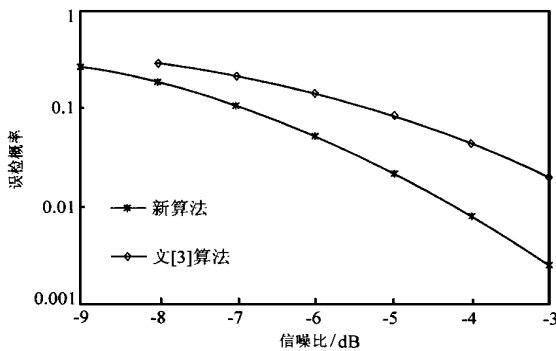


图 5 新算法与文[3]中的算法的统计平均性能比较结果

5 结论

本文提出了一种新的可用于 IS-95 CDMA 通信系统的多速率检测算法, 它与文[3]的算法相比, 计算复杂度相当, 但是

它的判定门限的设定独立于信噪比, 同时它的整体性能优于文[3]的算法. 并且, 在本文中, 我们也给出了相应的理论分析方法, 计算机仿真证实了本文理论分析的有效性.

参考文献:

- [1] TIA/EIA Interim Standard 95: Mobile station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular Standard [S]. July 1993.
- [2] Cohen E. and Lou H.L. Multi-rate detection for the IS-95 CDMA forward traffic channels using the 13KBPS speech coder [A]. Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Communications, Dallas, Texas, U.S.A., June 1996.
- [3] Xia X.-G. A hierarchical multi-rate detection method using discrete wavelet transform [J]. will appear in IEEE Signal Processing Letter.

作者简介:



樊平毅 1965 年生于河北省邢台市, 1985 年在河北大学数学系获学士学位, 1990 年在天津南开大学数学系获硕士学位, 1994 年 5 月在清华大学电子工程系获博士学位. 毕业后留在清华大学从事教学和科研工作, 现为清华大学电子工程系副教授. 1997 年 8 月至 1998 年 3 月在香港科技大学作访问学者, 任副研究员. 1998 年 5 月至 1999 年 9 月在美国特拉华大学作访问学者, 任研究员. 在国际权威杂志和国内核心期刊及重要的国际学术会议上发表论文近 60 篇. 主要的研究兴趣是无线宽带移动通信技术, 包括 CDMA、TDMA 技术、OFDM 技术、多速率编码调制技术等, 以及数字信号处理在通信系统中的应用.

夏香根 1986 年 7 月在天津南开大学数学系获硕士学位, 1992 年 12 月在美国南加州大学电机工程系获博士学位. 1993 年在南加州大学电机工程系任副研究员. 1993 年 11 月至 1995 年 2 月在美国空军技术研究所任研究科学家. 1995 年 3 月至 1996 年 8 月在美国休斯研究中心 Dapatterson 实验室任高级研究员. 1996 年 9 月起在美国特拉华大学电机与计算机工程系任教, 1999 年被提升为副教授. 从 1997 年 9 月起至今任休斯网络系统中心研究顾问. 从 1996 年 12 月至今任 IEEE Transaction on Signal Processing 学术杂志的编辑, 是多种 IEEE Transactions 和美国数学学会等十多种杂志的评论员. 现已在 IEEE Transaction 和国际数学杂志上发表学术论文 70 多篇. 主要的研究兴趣包括子波变换理论及应用, 多速率数字滤波理论与应用, 数字通信理论, 数字图像编码技术、雷达信号处理技术等.