

# 基于双向逐幸存路径处理的空时格形码软判决自适应解码

薛义生, 朱雪龙

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 本文提出一种针对 TDMA 下行链路的空时格形码自适应解码算法. 为充分利用下行链路相邻时隙前导序列中的正交导引信号, 该解码算法采用了双向逐幸存路径处理技术——正向处理利用基于当前时隙前导序列的自适应信道估计实现正向解码, 并将软判决结果传递给反向处理模块; 以正向软判决为先验知识, 反向处理利用基于下一时隙前导序列的自适应信道估计实现反向解码, 并将反向软判决作为最终结果输出. 计算机仿真结果表明: 在存在卷积外码的情况下, 与基于最大似然序列检测的单向硬判决解码相比, 基于所提出算法的软判决解码在 Doppler 频移小于 60 赫兹的时变信道中可提供 1~2 dB 的增益.

**关键词:** 空时格形码; 双向逐幸存路径处理; 软判决

**中图分类号:** TN929.532 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2000)11A-0080-03

## Soft decision Adaptive Decoding of Space-time Trellis Code Based on Bi-directional Per-survivor Processing

XUE Yi sheng, ZHU Xue long

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract:** We propose an adaptive decoding algorithm for space-time trellis code (STTC) used in the TDMA downlink. The bi-directional per-survivor processing (BD-PSP) is adopted in this algorithm to fully utilize the preambles of successive slots. First, the forward PSP makes soft decision with adaptive channel tracking based on the preamble of current slot. Then the backward PSP, taking the primary soft decision from forward PSP as the a priori knowledge, makes improved final soft decision output with adaptive channel tracking based on the preamble of next slot. Computer simulation shows that in the presence of a convolution outer code, the proposed soft decision adaptive decoding outperforms maximum likelihood sequence detection (MLSD) based hard decision decoding by 1~2 dB over slowly or moderately fast time-varying channels characterized by the Doppler frequency shift less than 60 Hz.

**Key words:** space-time trellis code (STTC); bi-directional per-survivor processing (BD-PSP); soft decision

### 1 引言

近年无线通信领域的研究表明, 基于多单元天线的发送分集技术是在无线链路层大幅度提高频带利用率的重要手段. 以空时格形码(STTC)为例, 在信道状态为解码器确切了解的条件下, 采用该编码方式的无线通信系统能使频带利用率提高到当前系统的 2~4 倍<sup>[1]</sup>.

在实际系统中应用 STTC 的难点之一是如何在接收端实现高质量的信道估计. 文献[2, 3]提出了在发送序列中周期插入正交导引信号(Orthogonal Pilot Symbols, OPS)的方法, 并得出该情形下 STTC 依然能极大地提高频带利用率的结论; 但引入周期导引信号无疑会降低系统的功率和频带利用效率. 为此, 文献[5]提出基于“逐幸存路径处理(Per Survivor Processing, PSP)”<sup>[4]</sup>的 STTC 自适应解码算法; 该解码算法利用发送序列

头部前导序列(Preamble)中的 OPS 得到初始的信道估计, 然后利用解码运算的反馈而不是周期插入的导引信号来跟踪时变信道, 从而给出最大似然序列检测(Maximum Likelihood Sequence Detection, MLSD)意义下的硬判决解码输出. 仿真结果表明, 该解码器可适用于 Doppler 频移小于 60 Hz 的 IS-136 时变信道. 在此基础上, 本文进一步提出一种基于双向逐幸存路径处理(BD-PSP)的 STTC 软判决自适应解码算法.

本文第 2 部分介绍所采用的 STTC 通信系统模型; 然后第 3 部分详细描述所提出的自适应解码算法; 仿真结果和有关结论则分别在第 4、第 5 部分给出.

### 2 空时格形编码通信系统模型

图 1 给出了在发射机和接收机同时采用 2 单元天线的

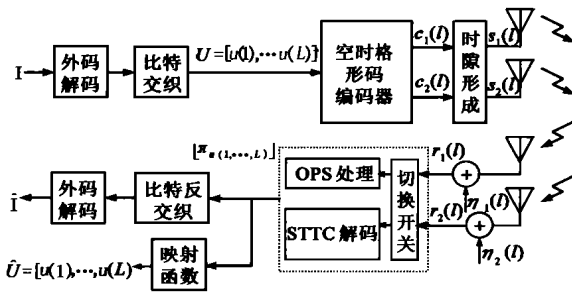


图 1 采用空时格形码的通信系统模型

TDMA 下行链路模型。I 为基站在第 k 时隙发送的信息序列; 经外码编码和比特交织后得到编码序列  $u(1), u(2), \dots, u(L)$ 。在 l 时刻,  $u(l) \in \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$  被基于图 2 的 STTC<sup>[1]</sup> 编码为  $[c_1(l), c_2(l), s(l)] = \text{Enc}(u(l), s(l-1))$ , 其中  $s(l) \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$  是编码器的状态而  $c_1(l), c_2(l)$  是基于 QPSK 星座的编码输出; 然后  $c_1(l), c_2(l)$  被空间映射到不同的发射天线单元并同时发送。

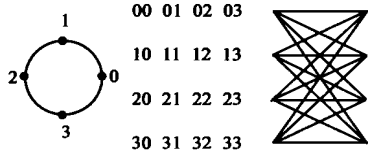
图 2 所采用的空时格形码<sup>[1]</sup>

图 3 给出了所适用的 TDMA 下行链路的帧结构。从图中可见, 每个 TDMA 时隙由长度为  $L_p$  的前导序列  $P = [p(1), p(2), \dots, p(L_p)]$  和长度为 L 的 STTC 码字  $C^{(q)} = [c^{(q)}(1), \dots, c^{(q)}(L)]$  组成, 其中  $p(l) = [p_1(l), p_2(l)]^T$ ,  $c^{(q)}(l) = [c_1^{(q)}(l), c_2^{(q)}(l)]^T$ ,  $(\cdot)^T$  表示转置运算而 q 表示该码字在集合  $\{C^{(1)}, C^{(2)}, \dots, C^{(Q)}\}$  中的索引。

前导序列 (第 k 帧)	STTC 码字 (第 k 帧)	前导序列 (第 k+1 帧)	STTC 码字 (第 k+1 帧)
-----------------	--------------------	-------------------	----------------------

图 3 所适用的 TDMA 下行链路帧结构

在平坦衰落假设下, 接收信号  $r_1(l), r_2(l)$  可表示为  $r_j(l) = \sum_{i=1}^2 \alpha_{ij}(l) s_i(l) + \eta_j(l)$ , 其中  $s_i(l) = p_i(l)$  或  $s_i(l) = c_i(l)$ ,  $\alpha_{ij}, \eta_j$  分别是第 i 个发射天线单元到第 j 个接收天线单元的信道衰落增益和第 j 个接收天线单元上均值为零方差为  $N_0$  的加性高斯白噪声。同时假设:

- (1)  $\eta_1(l), \eta_2(l)$  彼此独立;
- (2)  $\alpha_{ij}(l) \alpha_{qk}(l)$  当  $i \neq q, j \neq k; 1 \leq i, q \leq 2, 1 \leq j, k \leq 2$  时彼此独立;

显然, 假设 1 是常见假设而各天线单元间的距离足够大时假设 2 成立<sup>[3]</sup>。

通过引入  $\mathbf{r}(l) = [r_1(l), r_2(l)]^T$ ,  $\mathbf{H}_j(l) = [\alpha_{1j}(l), \alpha_{2j}(l)]^T$ ,  $\mathbf{H}(l) = [\mathbf{H}_1(l), \mathbf{H}_2(l)]^T$ ,  $\mathbf{c}(l) = [c_1(l), c_2(l)]^T$  和  $\boldsymbol{\eta}(l) = [\eta_1(l), \eta_2(l)]^T$ , 针对数据传输段  $\mathbf{R} = [\mathbf{r}(1), \mathbf{r}(2), \dots, \mathbf{r}(L)]$  我们得到  $\mathbf{r}(l) = \mathbf{H}(l) \mathbf{c}(l) + \boldsymbol{\eta}(l)$ 。

针对第 k 时隙, 图 1 中的 STTC 解码器根据  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{csi}(s)$ ,  $\mathbf{csi}(e)$  进行软判决解码, 其中  $\mathbf{csi}(s)$ ,  $\mathbf{csi}(e)$  分别表示由第 k,

第 (k+1) 时隙的前导序列得到的初始信道估计; 所得到的软判决输出  $\mathbf{L} \pi_{u(1) \dots u(L)} = \mathbf{L} \pi_{u(1)}, \pi_{u(2)}, \dots, \pi_{u(L)}$ , 其中  $\pi_{u(l)} = [\pi_1(l), \pi_2(l), \pi_3(l), \pi_4(l)]$ , 经比特反交织后被级联的软判决输入解码器用来实现外码解码而得到最终的判决结果 I。

### 3 基于双向逐幸存路径处理的软判决自适应解码器

引入  $\mathbf{U} = [u(1), u(2), \dots, u(L)]$ , 上述软判决按最大广义似然 (Generalized Likelihood)<sup>[7]</sup> 准则由下式得到:

$$\pi_m(l) = \log \left\{ \max_{U_m} \{ \Pr \{ \mathbf{U}, \mathbf{R} / \mathbf{csi}(s), \mathbf{csi}(e) \} \} \right\} \quad (1)$$

其中  $\Pr \{ \cdot \}$  表示概率分布,  $U_m$  是满足  $u(l) = u_m$  的  $\mathbf{U}$  的集合, 而对数运算的引入可以实现计算的简化。

为有效计算 (1), 本文提出了由图 4 所示的解码器结构。从图中可见, 该解码器由正向处理模块和反向处理模块级联而成——先由正向模块基于  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{csi}(s)$  算得初步的软判决结果  $\mathbf{L} \pi_{u(1) \dots u(L)}^F$  并将其传递给反向处理模块; 然后反向处理模块以  $\mathbf{L} \pi_{u(1) \dots u(L)}^F$  为先验知识, 依据  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{csi}(e)$  得到改善后的  $\mathbf{L} \pi_{u(1) \dots u(L)}^B$  并将其作为 (1) 的近似输出。

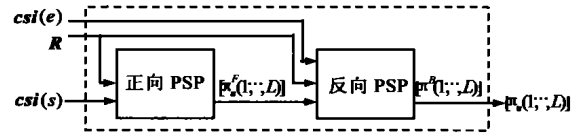


图 4 基于双向逐幸存路径处理的解码结构

在正向处理模块中,  $\mathbf{L} \pi_{u(1) \dots u(L)}^F$  的值可用下式表述

$$\pi_m^F(l-D) = \log \left\{ \max_{U_m(l)} \{ \Pr \{ \mathbf{U}(l), \mathbf{R}(l) / \mathbf{csi}(s) \} \} \right\} \quad (2)$$

其中 D 为判决延迟,  $\mathbf{U}(l) = [u(1), u(2), \dots, u(l)]$ ,  $\mathbf{R}(l) = [\mathbf{r}(1), \mathbf{r}(2), \dots, \mathbf{r}(l)]$ , 而  $U_m(l)$  是满足  $u(l-D) = u_m$  的  $\mathbf{U}(l)$  集合。定义  $\alpha(l) = \Pr \{ \mathbf{U}(l), \mathbf{R}(l) / \mathbf{csi}(s) \}$  并利用  $\log \{ \cdot \}$  是单调函数, 从式 (2) 得到

$$\pi_m^F(l-D) = \max_{U_m(l)} \{ \log \{ \alpha(l) \} \} \quad (3)$$

同时, 利用条件概率公式将  $\alpha(l)$  中的  $\Pr \{ \cdot \}$  展开, 得到以下的递推公式

$$\log \{ \alpha(l) \} = \log \{ \alpha(l-1) \} + \log \{ \gamma(l) \} + \log \{ \Pr \{ u(l) \} \} \quad (4)$$

其中  $\Pr \{ u(l) \}$  表示当前运算对于  $u(l)$  的先验概率知识,  $\alpha(l-1) = \Pr \{ \mathbf{U}(l-1), \mathbf{R}(l-1) / \mathbf{csi}(s) \}$ ,  $\gamma(l) = \Pr \{ \mathbf{r}(l) / \mathbf{U}(l-1), \mathbf{R}(l-1), u(l), \mathbf{csi}(s) \}$ 。

显然, (3) 中的解码运算可被描述为寻找度量  $\log \{ \alpha(l) \}$  具有最大值的路径, 而由式 (4) 知  $\log \{ \alpha(l) \}$  可递推求得; 于是, 以  $\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$  为状态引入 PSP 方式的信道估计器<sup>[4,5]</sup>  $\mathbf{H}(s_m, l) = \mathbf{F}_m(\cdot)$ ,  $m = \{1, \dots, 4\}$ 。将式 (3) (4) 所示的解码运算用格形搜索 (Trellis Search) 递推实现, 其中分支度量  $\log \{ \gamma(l) \}$  由负欧氏距离  $-\| \mathbf{r}(l) - \mathbf{H}(s_m, l) \mathbf{c}(l) \|^2$  近似得到。以上述关系为基础, 将  $\Pr \{ u(l) \}$  赋予固定的初始值后 (假设正向处理模块没有任何关于  $u(l)$  的先验知识),  $\mathbf{L} \pi_{u(1) \dots u(L)}^F$  可递推求得。

同样, 基于与式 (2) 对应的反向自适应解码表达式:

$$\pi_m^B(l+D) = \log \left\{ \max_{U_m(l)} [\Pr\{\dot{U}(l), R'(l)/csi(e)\}] \right\} \quad (5)$$

其中  $\dot{U}(l) = [u(l), u(l-1), \dots, u(l)]$ ,  $R'(l) = [r(l), r(l-1), \dots, r(l)]$  而  $\dot{U}_m(l)$  是满足  $u(l+D) = u_m$  的  $\dot{U}(l)$  的集合, 并将  $\log[\Pr\{u(l)\}]$  赋予由  $\pi_{u(1, \dots, L)}^F$  得到的相应数值, 反向解码运算利用相同的格形搜索给出最终的软判决解码输出  $\pi_{u(1, \dots, L)}^B$ .

上述导出的正向和反向解码的基本运算(格形搜索和自适应信道跟踪方式)与文献[6]中针对 ISI 信道提出的 PSP SSA 算法相同; 因此, 文[6]中有关 PSP SSA 算法复杂度的讨论在此依然有效, 令  $D=1$  (由所采用 STTC 决定的信道记忆长度), 则正向解码和反向解码与基于维特比算法的 PSPMLSD 解码具有可比的算法复杂度. 也就是说, 软判决 BD-PSP 解码算法的引入并非以大幅度增加算法复杂度为代价.

## 4 仿真结果

现将所讨论的 STTC 通信系统应用于 IS-136 类似的下行 TDMA 时变信道. 与图 1 相对应, 由编码效率 = 2/3, 约束长度 = 2, 八进制生成序列 = [17 06 15] 的卷积外码编码<sup>[8]</sup> (见图 5) 输出的 294 比特编码信息经过  $14 \times 21$  的块(Block)比特交织器后编码为长度  $L=148$  的 STTC 码字; 插入长度为 14 的 OPS 前导序列后构成 TDMA 时隙. 瑞利平坦衰落信道依据假设 1 和假设 2 生成, 并满足自相关函数  $R(\tau) = J_0(2\pi f_D \tau)$ , 其中  $J_0(\cdot)$  为第一类零阶贝塞尔函数而  $f_D$  为多普勒频移<sup>[9]</sup>; 显然,  $f_D$  可用来衡量所模拟信道的衰落速度. STTC 解码软判决输出(浮点表示)经比特反交织后被维特比解码器用来实现卷积外码解码以得到  $I$ .

以 Matlab 为仿真平台, 在精确载波恢复和精确定时的前提下, 本文以误帧率(FER)为度量仿真了所提出 BD-PSP 解码算法的性能——带 Code 前缀的“误帧”指  $I \neq I$  而带 UnCode 前缀的误

帧指  $U \neq U$ , 其中  $\hat{u}(l)$  由  $\pi_{u(l)}$  映射得到——并在图 6 和图 7 中分别给出  $f_D = 10\text{Hz}$  和  $f_D = 60\text{Hz}$  情况下的仿真结果. 为与其他解码方案相比较, 上述图中同时给出了相同仿真条件下标记为 PSPMLSD 和 F-PSP 的另外两种情况的仿真结果; 其中,

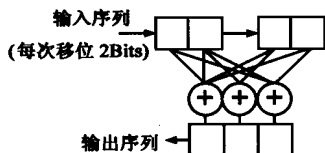


图 5 卷积外码编码器

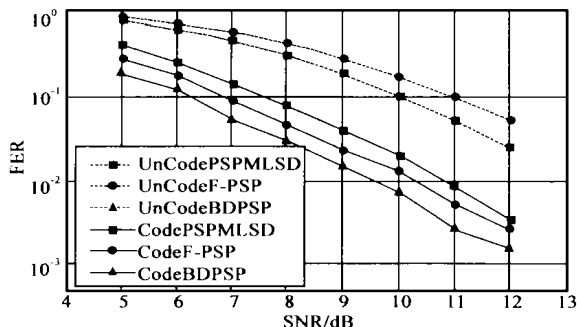


图 6 FER vs. SNR ( $f_D = 10\text{Hz}$ )

PSPMLSD 指利用文献[5]所提出的 PSPMLSD 算法实现对 STTC 的硬判决自适应解码的情况(此时采用硬判决输入维特比解码器实现外码解码), 而 F-PSP 则是只采用本文所提出的正向软判决自适应解码算法的情况. 在上述图中 SNR 是每个接收天线单元的平均信噪比; 而仿真中所有自适应解码算法都采用 LMS 算法跟踪时变信道, 其中 LMS 算法的步长为  $\mu = 0.1$  ( $f_D = 10\text{Hz}$ ) 和  $\mu = 0.3$  ( $f_D = 60\text{Hz}$ ).

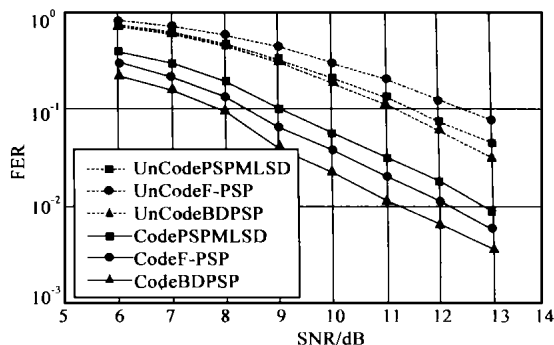


图 7 FER vs. SNR ( $f_D = 60\text{Hz}$ )

从图中可见在所仿真的有级联外码的情况下, 与基于 PSPMLSD 的硬判决解码方案相比基于 BD-PSP 的软判决解码可提供 1.2dB 的增益; 与单向处理相比双向处理带来平均约 0.8dB 的增益.

## 5 结论

本文提出一种适用于 IS-136 类似的 TDMA 下行链路的 STTC 自适应解码算法. 计算机仿真结果表明, 在多普勒频移小于 60Hz 的时变信道下, 与基于 PSPMLSD 的硬判决解码方案相比, 本文所提出的 BD-PSP 解码算法与软判决输入外码解码算法相配合可明显提高误帧率意义下的系统性能; 而且该增益的取得仅以有限增加的运算复杂度为代价.

### 作者简介:



薛义生 1994年毕业于北京清华大学电子工程系本科, 现为清华大学电子工程系信号与信息处理专业博士研究生, 研究方向为多单元天线发送分集技术.



朱雪龙 1958年毕业于清华大学无线电系, 于1963年获硕士学位. 自1958年起, 先后从事遥感、PCM、数据传输、差错控制编码、语音信号处理、调制理论、移动通信等领域的研究工作. 1985到1986年, 去英国爱丁堡大学电气工程系作访问学者. 1995年, 去韩国 KAIST 大学作客座教授. 现为清华电子工程系教授. 研究兴趣包括数字信号处理及应用、语音和图象压缩和数字移动通信等领域.

用向被测实现施加特定输入, 观测其输出的非在线方式进行测试; 目前还有一些厂商提供的测试系统, 比如 HP Router Tester<sup>[11]</sup>, NetCom Systems 的 SmartBits<sup>[12]</sup> 等, 主要关注被测实现的性能指标, 如吞吐量、延迟、抖动等, 通过向被测实现发出大量测试数据, 测量有关参数。

状态机测试是协议测试的非常基本的重要内容, 而状态的判定是状态机测试的基础和前提, 任何测试方法、测试系统首要地都必须解决这个问题。本文提出的状态同步算法采用逆向的方式描述协议的状态机, 考察协议事件与协议状态的关系, 通过构造协议事件状态表来描述此关系, 进一步利用表运算, 利用在线观测到的协议会话确定协议实现的状态, 从而解决了在线测试方法的状态判定问题。在理论上, 文中对该算法进行了复杂性分析, 得出了影响因素并进行了改进与完善; 在实践中, 该算法应用于开发的在线测试系统, 并对若干协议进行了测试, 取得了较好的效果。在线测试系统的进一步完善和功能增强是今后的工作重点。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 吴建平, 陈修环, 郝瑞兵等. 基于形式化技术的协议集成测试系统—PIIS [ J ]. 清华大学学报, 1998, 38( S1 ): 26– 29.
- [ 2 ] W. Simpson. The Point to Point Protocol ( PPP ) [ S ]. RFC1661. 1994.
- [ 3 ] Rekhter Y, Li T. A Border Gateway Protocol 4 ( BGP-4 ) [ S ]. RFC 1771, 1995.
- [ 4 ] 冯晓冬. 基于形式化方法的 IP/ICMP 协议一致性测试的研究 [ D ]. 硕士论文. 清华大学, 1998.
- [ 5 ] Gregor V Bochmann. Finite state description of communication protocol [ J ]. Computer Networks, 1978, 2: 361– 372.
- [ 6 ] Y. N. Shen, F. Lomhardi and A. T. Dahbura. Protocol conformance testing using multiple UIO sequences [ J ]. IEEE Transactions on Communications, 1992: 40( 8 ).

- [ 7 ] WU Jiarping and Samuel T. Chanson. Testing sequence derivation based on external behavior expression [ A ]. Proc. of 2nd International Workshop on Protocol Test Systems [ C ], Berlin, Germany, 1989: 83– 96.
- [ 8 ] WANG Jianguo, HAO Ruibing and WU Jiarping. TUGEN: An automatic test case generator integrating dataflow and controlflow test methods [ A ]. Proc. of IEEE International Conference on Communications [ C ]. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1998: 286– 290.
- [ 9 ] Alfred V. Aho, Anton T. Dahbura, David Lee, M. Umit Uvar. An optimization technique for protocol conformance test generation based on UIO sequences and rural chinese postman tours [ A ]. Protocol Specification [ C ]. Testing and Verification VIII. IFIP 1988: 223– 232.
- [ 10 ] ISO/IEC. OSI Conformance Testing Methodology and Framework, Part 3: The Tree and Tabular Combined Notation ( TTCN ) [ S ]. DIS 9646-3, 1990.
- [ 11 ] Agilent Technology. <http://www.tm.agilent.com/tmo/datasheets/English/RouterTester.html> [ Z ]. 1999.
- [ 12 ] NetCom Systems. <http://www.netcomsystems.com> [ Z ]. 2000.

#### 作者简介:



赵邑新 1974 年生, 1993 年考入清华大学计算机系, 1998 年获学士学位, 并继续攻读博士学位, 专业方向是计算机网络体系结构, 网络协议测试, 当前工作重点为路由协议测试。

吴建平 1953 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向是计算机网络体系结构, 网络协议测试, 形式化技术。

(上接第 82 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] Vahid Tarokh, N. Seshadri, A. R. Calderbank. Space time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction [ J ]. IEEE Trans., 1998, IT-44( 2 ): 744– 765.
- [ 2 ] Vahid Tarokh, A. Naguib, N. Seshadri, A. R. Calderbank. Space time codes for high data rate wireless communication: performance criteria in the presence of channel estimation errors, mobility, and multiple paths [ J ]. IEEE Trans., 1999, COM-47( 2 ): 199– 207.
- [ 3 ] A. Naguib, Vahid Tarokh, N. Seshadri, A. R. Calderbank. A space time coding modem for high data rate wireless communications [ J ]. IEEE Journal., 1998, SAG 16( 8 ): 1459– 1478.
- [ 4 ] Riccardo Raheli, Andreas Polydoros, Ching Kae Tzou. Per survivor processing: a general approach to MLSE in uncertain environments [ J ]. IEEE Trans., 1995, COM-43( 2/3/4 ): 354– 364.
- [ 5 ] XUE Yisheng, ZHU Xuelong. PSP decoding for space time trellis code [ C ], accepted by APCCAS' 2000.
- [ 6 ] Achilleas Anastasopoulos, Andreas Polydoros. Soft decisions per survivor processing for mobile fading channels [ C ]. Proc. of IEEE VTC' 97: 705– 709.
- [ 7 ] Achilleas Anastasopoulos. Adaptive soft input soft output algorithm for iterative detection [ D ], Ph. D Dissertation, University of Southern California, Apr. 2000.
- [ 8 ] John G., Proakis, Digital Communication [ M ], New York: McGraw-Hill, 1995.
- [ 9 ] W. C. Jakes, Microwave Mobile Communications [ M ]. New York: Wiley, 1974.