

串行级联空时码的设计

李颖 郭旭东 王新梅

(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文设计了一类适用于串行级联空时码(Serially Concatenated Space-Time Code, SCSTC)的两天线卷积空时码(Convolutional Space-Time Code, CSTC),并将该设计方法推广到多天线的情况,使 SCSTC 的信息速率可随天线数增加而增加;将 EXIT Chart 的概念推广到多天线 SCSTC 中,在此基础上分析了所设计 SCSTC 的收敛特性。与现有的 SCSTC 相比,该文设计的 SCSTC 具有更快的收敛速度和更好的抗衰落性能。

关键词: 串行级联空时码,卷积空时码,收敛,外信息转移特性

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)11-1732-05

The Design of Serially Concatenated Space-Time Codes

Li Ying Guo Xu-dong Wang Xin-mei

(The State Key Lab. of ISN, Xidian University, Xi'an 71007, China)

Abstract A class of Convolutional Space-Time Code(CSTC) is designed for Serially Concatenated Space-Time Code(SCSTC) with an arbitrary number of transmit antennas. The most apparent characteristic of the designed SCSTC is that the data rate increases with the number of transmit antennas. The concept of EXIT (EXtrinsic Information Transfer) Chart is generalized to multiple antenna system to study the convergence of SCSTC. Compared with the available SCSTC with space-time trellis code as the inner code, the new SCSTC can converge earlier and have improved performance.

Key words Serially Concatenated Space-Time Code (SCSTC), Convolutional Space-Time Code(CSTC), Convergence, EXtrinsic Information Transfer Characteristics (EXIT Chart)

1 引言

作为实现带宽受限衰落信道中高速率数据传输的有效手段之一,空时编码技术已经受到越来越多的关注。在实际应用中,常常将二进制纠错码作为外码,空时码作为内码来构造串行级联空时码(Serially Concatenated Space-Time Code, SCSTC),其中内码可以采用空时分组码(Space-Time Block Code, STBC)、网格空时码(Space-Time Trellis Code, STTC)和分层空时码(Layered Space-Time Code, LSTC)。上述3种级联方式的侧重点各有不同:以 STBC 为内码的 SCSTC 的编译码复杂度相对简单;以 LSTC 为内码的 SCSTC 具有较高的信息速率;以 STTC 为内码的 SCSTC 可获得较大的分集增益和交织增益,具有较好的抗衰落性能。本文重点研究以 STTC 为内码的 SCSTC。

文献[1]以 RS 码为外码构造了适合于 GSM 的 SCSTC,

文献[2]则采用卷积码作为外码,文献[1, 2]采用的内码均是文献[3]给出的标准 STTC。为获得交织增益,文献[4]和文献[5]将递归的概念引入 STTC, Gualti 和 Narayanan 在延时分集基础上提出一种延时递归网格空时码(Delay Recursive Space-Time Trellis Code, DR-STTC)^[4],并分析了基于 BPSK 调制的 SCSTC 的一致界(Union bound)性能,另外, Gualti 和 Narayanan 还利用高码率码作为外码来减少 SCSTC 中的速率损失。

文献[1-4]从不同角度研究了 SCSTC 的性能,但都没有解决如何设计 R-STTC 来提高 SCSTC 的性能。虽然文献[4]指出具有较好距离谱特性的 R-STTC 可提高 SCSTC 的抗衰落性能,但 R-STTC 生成多项式需要搜索通过确定,复杂度很大。我们研究发现,SCSTC 的性能不仅由 STTC 的距离谱特性所决定,还受到 SCSTC 中内外码匹配关系的影响。前者决定 SCSTC 在高信噪比时的性能,即影响错误平层的高

2004-5-31 收到,2004-11-25 改回

国家自然科学基金和香港科技局联合资助项目(60131160742),东南大学移动通信重点实验室开放课题和重庆市/信息产业部移动通信技术重点实验室资助课题

低；而后者决定 SCSTC 在低信噪比的性能，即迭代译码开始收敛的起点和收敛速度。本文从上述结论出发，给出一种结构比较简单，适合于串行级联系统的卷积空时码 (Convolutional Space-Time Code, CSTC) 设计方法，并将其推广到多发送天线系统，使系统传输速率能随发送天线数增加而增加，同时利用外信息转移特性 (EXtrinsic Information Transfer Characteristic, EXIT Chart)^[6] 分析 SCSTC 采用迭代译码时的收敛特性。文中第 2 节介绍 SCSTC 的系统模型和相应的迭代译码算法；第 3 节介绍适合于 SCSTC 的 CSTC 设计方法；第 4 节将 EXIT Chart 分析方法推广到多天线情况，分析迭代译码过程中 SCSTC 各分量码的外信息传递特性和相应的收敛特性；最后给出仿真结果和结论。

2 系统模型

以二进制纠错码为外码，R-STTC 为内码的串行级联系统如图 1 示，信息序列 \mathbf{a} 经外码编码后得到序列 \mathbf{u} ， \mathbf{u} 经交织器处理后送入 R-STTC 编码器，得到 N 组并行的符号序列 $c_i^j, i=1, 2, \dots, N$ ，分别对应一根发送天线。

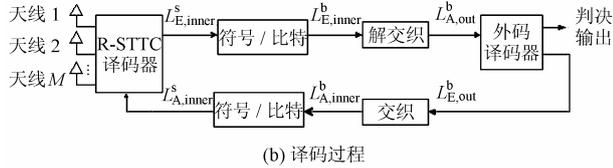
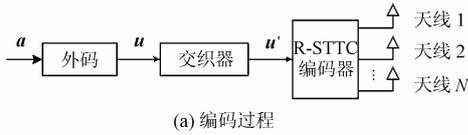


图 1 串行级联空时编码系统模型

设第 j 根接收天线在 t 时刻收到的信号为 r_t^j ，则有

$$r_t^j = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,j} c_t^i + \eta_t^j \quad (1)$$

其中 $\alpha_{i,j}$ 是第 i 根发送天线到第 j 根接收天线之间的信道衰落因子，服从均值为零，每维方差为 $1/2$ 的复高斯分布， η_t^j 是第 j 根接收天线上的加性噪声，是均值为零，每维方差为 $N_0/2$ 的复高斯随机变量。设每根发送天线上的信号能量为 E_s ，则第 j 根接收天线上收到的信号平均能量为 NE_s ，对应信噪比 NE_s/N_0 ，若该系统的谱效率为 R ，则有 $NE_s/N_0 = NR E_b/N_0$ 。后文中用 $\text{SNR} = NE_b/N_0$ 表示每根接收天线上的信噪比。

在接收端，译码过程如图 1(b) 示，R-STTC 译码器根据 M 个接收信号和符号先验信息 $L_{A,inner}^s$ (概率值) 计算每个 2^b 进制符号的外信息 $L_{E,inner}^s$ (概率值)，“符号/比特”转换器将 $L_{E,inner}^s$ 转换为关于每个比特的的外信息 $L_{E,inner}^b$ (对数似然比)，经解交织后作为先验信息 $L_{A,inner}^b$ 送入外码译码器；外码译码器利用该先验信息计算序列 \mathbf{u} 中每个比特的的外信息 $L_{E,out}^b$ (对数似然

比)，经交织和“比特/符号”转换成关于每个符号的先验信息 $L_{A,inner}^s$ 送入 R-STTC 译码器，完成一次迭代过程。在第一次迭代时，符号先验信息 $L_{A,inner}^s$ 初始化为 $1/2^b$ 。

3 适合于 SCSTC 的 CSTC 设计

图 2 给出采用 4PSK 调制的 4 状态 DR-STTC 编码器示意图^[5]，天线 2 上发送的信号经过一个符号周期的延时后，经由天线 1 重新发送一遍。设在 t 时刻 $\mathbf{a} = (a_{t-1}, b_{t-1}, a_t, b_t)$ ，则比特与符号之间的映射关系为

$$\begin{pmatrix} x_t^1 & x_t^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{t-1} & b_{t-1} & a_t & b_t \end{pmatrix} \mathbf{aG} \quad (2)$$

其中 \mathbf{G} 定义为 DR-STTC 的生成矩阵。

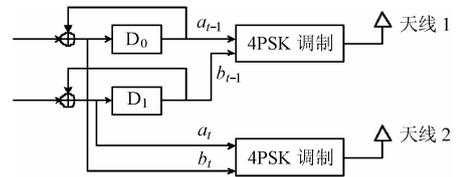


图 2 基于延时分集的递归 STTC 编码器示意图

分析图 2，可将 DR-STTC 编码器划分成两部分，其中一部分是两个生成多项式为 $1/(1+D)$ ， $D/(1+D)$ 的两状态递归卷积码，称其为 DR-STTC 的分量码；另一部分则是两个 4PSK 调制器，由生成矩阵 \mathbf{G} 完成二进制比特与发送符号之间的映射。因此，在设计适合于 SCSTC 的空时码时，可分两步完成：首先选择二进制分量码，然后在此基础上确定比特到符号的映射关系，即生成矩阵 \mathbf{G} 。设 CSTC 编码器状态数为 2^v ，调制阶数为 2^b ，则

步骤 1 (分量码的确定) (1) 分量码状态数的确定根据 v 和 b 的关系分两种情况讨论：

(a) $v=b$ 选用 b 个并行的 $1/2$ 码率两状态分量码，每个分量码对应一个输入信息比特，所有分量码的输出为 $2b$ 比特，此时发送天线数 $n=2b/b=2$ ，系统传输速率为 $b \text{ bit/s/Hz}$ 。

(b) $v>b$ 目前常用方法是采用 b 个并行分量码构成 R-STTC 编码器。由于 $v>b$ ，必然会存在一些状态数大于 2 的分量码，此时系统传输速率保持 $b \text{ bit/(s}\cdot\text{Hz)}$ 不变，该方法实际是以复杂度为代价来换取抗衰落性能的提高。但在 SCSTC 中，考虑到可以利用外码进行纠错，往往并不需要用太强的内码，因此，本文利用增加的复杂度来换取数据速率的提高，即采用 v 个并行的两状态分量码 (相当于信息比特数为 v)，构造一种适合于多发送天线的 CSTC，使系统速率随发送天线增加。此时发送天线数 $n=2v/b>2$ ，传输速率为 $v \text{ bit/(s}\cdot\text{Hz)}$ 。

(2) 分量码生成多项式的确定 对于两状态递归卷积码, 本文选用生成多项式为 $(1, D/(1+D))$ 的系统递归卷积码, 易证该卷积码的最小汉明重量为 3, 而图 2 中分量码的最小汉明距离为 2。

步骤 2 (分量码输出比特的映射) 为增加发送符号之间的最小欧氏距离, 映射基本规则为: 保证每个分量码的输出比特分布在不同发送符号的不同位置上。设 $l_1^b, l_2^b, \dots, l_i^b$ 为一调制符号 x_i 的二进制表示, 即 $x_i = \sum_{j=1}^b l_j^i 2^{j-1}$, 其中 l_j^i 表示该

符号的最低有效位(Lowest Significant Bit, LSB), l_i^b 表示该符号的最高有效位(Most Significant Bit, MSB), 如果将某一个分量码的校验比特分配到某发送符号的最低有效位上, 则该分量码的信息比特必须分配到另一发送符号的其他位置上。

对于 4PSK 调制, 可画出如图 3 示的 $N=n$ 根天线 CSTC 编码器示意图, 此时的数据速率是 n bit/s/Hz。由图 3 可看出: (1) 如果某一个移位寄存器的输出比特分配到某个发送符号的最低有效位(LSB)上, 则其对应的信息比特则分配到另一个符号的最高有效位上(MSB); (2) 每个分量码的两个输出比特分配到两个发送符号上, 因此可获得一定的分集增益, 并可保证传输速率能随发送天线线性增加。虽然文献[5]中也提出一种基于 4PSK 调制的三天线 DR-STTC, 但其信息速率仍保持 2 bit/(s·Hz), 而图 3 给出的三天线 CSTC 的数据速率可达到 3bit/(s·Hz)。仿真结果表明: 对于三天线 SCSTC, 采用 CSTC 为内码的 SCSTC 的抗衰落性能比基于 DR-STTC 的只有 0.3dB 左右的损失, 且两个级联系统的编译码复杂度基本相同。

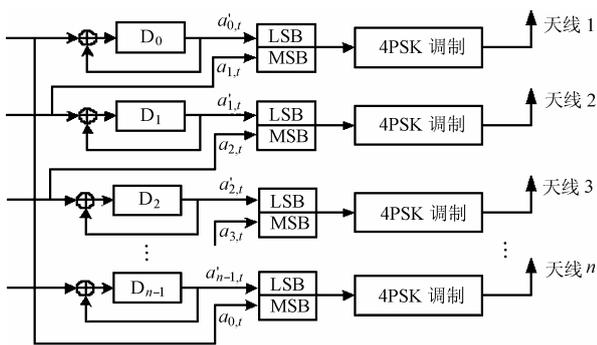


图 3 基于 4PSK 调制的 CSTC 构造方法

对于更高阶调制方式, 由于每个调制符号由多个二进制比特表示($b>2$), 满足步骤 2 中基本映射规则的 CSTC 有多种选择, 可按照最小欧氏距离最大的原则搜索确定分量码输出比特与发送符号之间的映射关系。

为分析上述设计方法的合理性, 需估计由此构造的 SCSTC 的性能, 其中一致界(Union bound)可准确估计 SCSTC

采用最大似然译码时在高信噪比的性能。但在实际系统中, SCSTC 的译码一般通过迭代实现, 即各分量码先独立译码, 然后通过交换外信息实现联合译码, 是一种次佳译码算法。此时, 各分量码之间能否成功交换外信息, 不是由级联码的整体结构和距离谱决定, 而要考虑各分量码能否在所采用的迭代译码算法下实现匹配。因此, 本文将 Brink 提出的 EXIT Chart 分析方法^[6]引入到多天线系统中, 通过分析每个分量码译码器输入、输出互信息的变化来分析所设计 SCSTC 的收敛特性。

4 SCSTC 的 EXIT Chart 特性分析

4.1 R-STTC 译码器输出外信息特性

由图 1(b), R-STTC 的后验比特外信息 $L_{E,inner}^b$ (对数似然比) 是根据接收信号 r_i^j 和先验信息 $L_{A,inner}^b$ (对数似然比) 计算得到的, 因此后验互信息 $I_{E,inner}$ 是先验互信息 $I_{A,inner}$ 和信噪比 E_b/N_0 的函数, 即^[6]

$$I_{E,inner} = f(I_{A,inner}, E_b / N_0) \tag{3}$$

其中 $I_{E,inner} = I(L_{E,inner}^b, \mathbf{u}')$ 和 $I_{A,inner} = I(L_{A,inner}^b, \mathbf{u}')$ 。当交织长度 L 足够大时, 可认为序列 \mathbf{u}' 中各比特独立等概, 且 $L_{E,inner}^b$ 和 $L_{A,inner}^b$ 的条件概率密度 $P_{E,inner}(\xi|B=b)$ 和 $P_{A,inner}(\xi|B=b)$ 近似服从高斯分布。设 $L_{E,inner}^b$ 的方差为 $\sigma_{E,inner}^2$, 则均值 $\mu_{E,inner} = \sigma_{E,inner}^2 / 2$, 由文献[6]结论得:

$$I_{E,inner} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{E,inner}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(\xi - \sigma_{E,inner}^2/2)^2}{2\sigma_{E,inner}^2}\right) \times \ln[1 + e^{-\xi}] d\xi \tag{4}$$

利用式(4)和蒙特卡罗方法, 即可根据先验互信息 $I_{A,inner}$ 的大小和 R-STTC 译码器得到相应的后验互信息 $I_{E,inner}$, 如图 4 所示, 图中 L_E 和 L_A 分别表示 R-STTC 译码器的输出外信息 $L_{E,inner}^b$ 和输入先验信息 $L_{A,inner}^b$, $\sigma_{A,inner}^2$ 为输入先验信息 $L_{A,inner}^b$ 的方差。

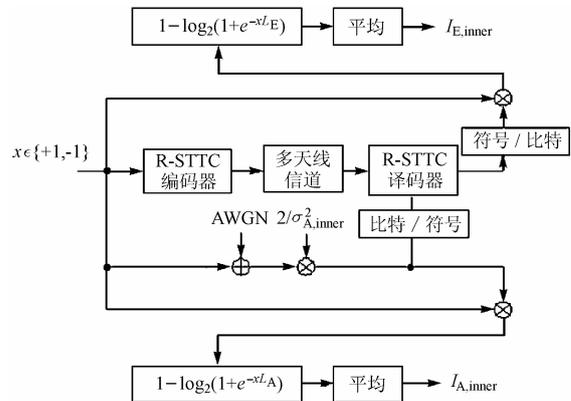


图 4 R-STTC 输入、输出互信息计算过程

4.2 外码译码器输出外信息特性

由图 1(b), 外码译码器输出的后验比特外信息 $L_{E,out}^b$ (对数似然比) 只根据先验信息 $L_{A,out}^b$ (对数似然比) 计算得到的, 因此外码的后验互信息 $I_{E,out}$ 与信噪比无关, 仅是先验互信息 $I_{A,out}$ 函数, 即

$$I_{E,out} = f(I_{A,out}) \quad (5)$$

其中 $I_{E,out} = I(L_{E,out}^b, \mathbf{u})$ 和 $I_{A,out} = I(L_{A,out}^b, \mathbf{u})$ 。计算 $I_{E,out}$ 和 $I_{A,out}$ 时, 同样假设输入先验信息 $L_{A,out}^b$ 和输出后验信息 $L_{E,out}^b$ 服从高斯分布。由于外码编码器的输出数据序列 \mathbf{u} 全部送入 R-STTC 编码器, 所以外码译码器需要计算 \mathbf{u} 的外信息作为先验信息送入 R-STTC 译码器, 因此互信息 $I_{E,out}$ 和 $I_{A,out}$ 的计算与图 4 有所不同, 具体计算过程如图 5 示, 图中 L_E 和 L_A 分别表示外码译码器的输出外信息 $L_{E,out}^b$ 和输入先验信息 $L_{A,out}^b$, $\sigma_{A,out}^2$ 为输入先验信息 $L_{A,out}^b$ 的方差。

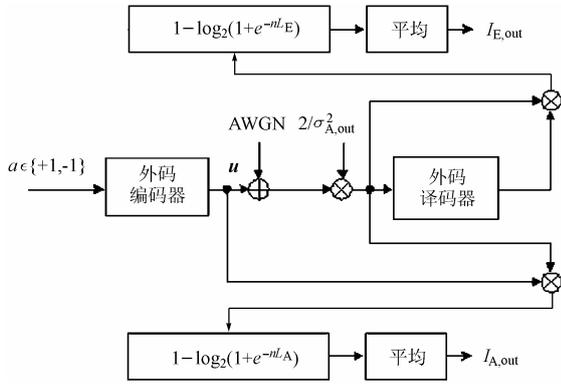


图 5 外码输入、输出互信息计算示意图

4.3 SCSTC 的 EXIT Chart 特性

对于两天线的 SCSTC, 研究 SCSTC1 和 SCSTC2 两种系统的收敛特性, 其中 SCSTC1 采用文献[4]中的 DR-STTC 为内码, SCSTC2 采用图 3 给出的两天线 CSTC 为内码, 两种系统的外码均是生成多项式为 $(1+D, D)$ 的两状态卷积码。利用图 4 和图 5 可分别得到 DR-STTC 和卷积码的互信息传递关系 $I_{E,inner} = f(I_{A,inner}, E_b/N_0)$ 和 $I_{E,out} = f(I_{A,out})$, 将两条曲线画在一个图中, 如图 6(a) 所示, 同理可计算出两天线 CSTC 与两状态卷积码之间的互信息转移特性, 如图 6(b) 所示。

比较图 6(a) 和图 6(b) 可知: (1) SCSTC1 中两个分量码对应的 EXIT Chart 曲线在 SNR=2.9dB 时开始分离, 说明当信噪比大于 2.9dB 时, SCSTC1 的译码性能会随着迭代次数的增加而改善, 即开始收敛; (2) SCSTC2 的收敛点在信噪比在 SNRR=2.1dB 附近, 比 SCSTC1 提前 0.8dB。因此, 从收敛性角度看, 本文设计的 CSTC 更适合与卷积码构成串行级联系统。

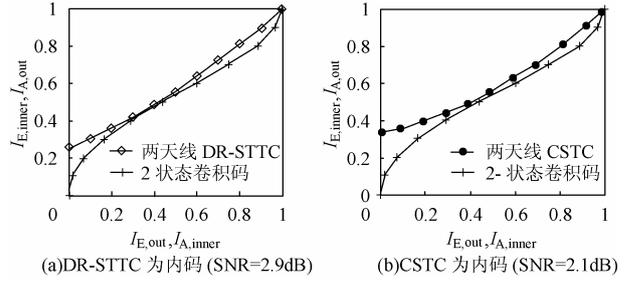


图 6 两状态卷积码为外码, 不同 STTC 为内码的 SCSTC 的收敛性比较(两发一收, 独立衰落信道)

5 仿真结果

5.1 两天线 SCSTC 的性能比较

对于两天线的 SCSTC, 我们考虑 SCSTC1 和 SCSTC2 两种系统, 其中 SCSTC1 采用 DR-STTC 为内码, SCSTC2 采用 CSTC 为内码, 两个系统的外码均为 1/2 码率的 2 状态卷积码, 交织器是一长为 6192 的随机交织器。图 7 给出了 SCSTC1 和 SCSTC2 采用一根接收天线时在独立衰落信道下的误比特曲线, 图中实线表示 1 次迭代译码的性能, 点线表示 5 次迭代译码的性能, 短线表示 10 次迭代译码的性能。

由图 7 可看出: (1) SCSTC1 和 SCSTC2 采用迭代译码时的收敛点和第 4 节的结论基本一致, 即以 DR-STTC 为内码的 SCSTC1 在信噪比 3dB 左右开始收敛, 而以 CSTC 为内码的 SCSTC2 在 2dB 左右开始收敛; (2) 在 5 次迭代译码时, SCSTC2 可获得更大的分集增益, 但随着迭代次数增加, 两种级联系统的分集增益逐渐趋于相同; (3) SCSTC2 的性能始终好于 SCSTC1, 当采用 10 次迭代译码且误比特等于 10^{-5} 时, SCSTC2 比 SCSTC1 有大约 1dB 的增益。

5.2 三天线 SCSTC 的性能比较

对于三天线 SCSTC, 我们考虑 SCSTC3、SCSTC4 和 SCSTC5 3 种系统, 其中 SCSTC3 采用多项式为 $1+D^2$ 的 DR-STTC 为内码^[5], SCSTC4 采用多项式为 $1+D+D^2$ 的三天线 DR-STTC 为内码, SCSTC5 采用图 3 给出的三天线 CSTC 为内码, 外码均为 1/2 码率的两状态卷积码, 交织器是长为 2048 的随机交织器。SCSTC4 和 SCSTC5 的信息速率都为 1bit/(s·Hz), 而 SCSTC5 的信息速率为 1.5bit/(s·Hz)。图 8 给出上述 3 种系统采用一根接收天线时在独立衰落信道下的误帧率曲线。由图 8 可看出: (1) 在迭代次数较少时, SCSTC5 的性能要差于两种基于 DR-STTC 的级联码; (2) 随着迭代次数的增加, SCSTC5 的性能逐渐优于 SCSTC4, 但比 SCSTC3 差 0.3dB 左右; (3) 译码迭代次数等于 10 时, SCSTC5 的分集增益要好于其他两种级联码。

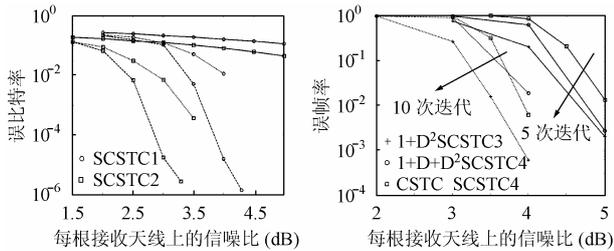


图7 不同SCSTC(两发一收)在独立衰落信道下的误比特率

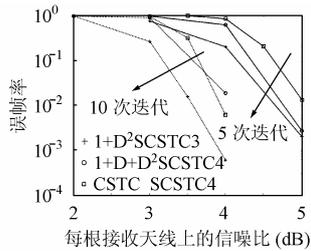


图8 不同SCSTC(三发一收)在独立衰落信道下的误帧率

6 结束语

本文设计了一类适合于串行级联系统的卷积空时码,并将EXIT Chart分析工具引入到多天线系统,对SCSTC在迭代译码下的收敛性进行了分析。与现有的SCSTC相比,本文设计的SCSTC有以下两个优点:相比于文献[5]中的两天线SCSTC,本文设计的SCSTC不仅有较早的收敛点,还具有较好的抗衰落性能;与文献[5]中的三天线SCSTC相比,本文设计的三天线SCSTC以很小的性能损失为代价(0.3dB)换取了较高信息传输速率。

参考文献

- [1] Naguib A F, Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. A space-time coding modem for high-data rate wireless communications. *IEEE J. on Select. Areas Commun*, 1998, 16(8): 1459 – 1478.
- [2] Kim W G, Ku B, Back L, et al.. Serially concatenated space-time

codes for high rate wireless communication systems. *Electronic Letters*, 2000, 36(7): 646 – 648.

- [3] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and codes construction. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1998, 44(2): 744 – 765.
- [4] Lin X, Blum R S. Guidelines for serially concatenated space-time code design in flat rayleigh fading channels. Third IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Taiwan, China, March, 2001: 247 – 250.
- [5] Gulati V and Narayanan K R. Concatenated codes for fading channels based on recursive space-time trellis codes, *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, 2003, 2(1): 118 – 128.
- [6] Brink S T. Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(10): 1727 – 1737.

李颖: 女, 1973年生, 讲师, 博士生, 研究方向为MIMO、空时编码技术和信息理论。

郭旭东: 男, 1971年生, 硕士生, 研究方向为MIMO和空时编码技术。

王新梅: 男, 1937年生, 生教授, 博士生导师, 研究方向为信道编码、信息理论和信息安全等。