

## 适用于串行级联结构的广义递归网格空时码设计

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:** 该文结合网格空时码(STTC)和分层空时码(BLAST)的优点, 利用多个高码率卷积码, 设计了一类适用于串行级联结构的广义递归 STTC(G-RSTTC)。相比于传统以递归 STTC 为内码的串行级联空时码(SCSTC), 其数据速率可随发送天线数增加而线性增加; 相比于以 BLAST 为内码的 SCSTC, 基于 G-RSTTC 的 SCSTC 可获得更大的分集增益和编码增益。

**关键词:** 串行级联空时码; 网格空时码; 广义递归网格空时码

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1872-05

## Design of Generalized Recursive Space-Time Trellis Codes for Serial Concatenation

Li Ying Guo Xu-dong Wang Xin-mei

(The State Key Lab. of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Combing space-time trellis codes and layered space-time codes, a new Generalized Recursive Space-Time Trellis Code(G-RSTTC) is designed for a Serial Concatenated Space-Time Code(SCSTC). Compared with SCSTC using the traditional recursive STTC as the inner code, the G-RSTTC based SCSTC can increase the data rate with the increase of the transmit antenna number. Compared with the SCSTC using BLAST as the inner code, the G-RSTTC based SCSTC achieve higher diversity gains and coding gains.

**Key words:** Serially Concatenated Space-Time Code(SCSTC); Space-Time Trellis Code(STTC); Generalized Recursive Space-Time Trellis Code(G-RSTTC)

### 1 引言

在未来移动通信系统中, 以二进制信道编码为外码, 空时码作为内码的串行级联空时码(SCSTC)是极有潜力的解决方案之一。可将现有SCSTC划分成3类: 第1种是以递归网格空时码(Recursive Space-Time Trellis Code, R-STTC)为内码的SCSTC<sup>[1,2]</sup>; 第2种是以分组空时码(STBC)为内码的SCSTC<sup>[3]</sup>; 第3种是空时编码比特交织调制系统(ST-BICM)<sup>[4,5]</sup>, 基本实现方式是将二进制纠错码与V-BLAST系统通过交织器级联, 也称为Turbo-BLAST<sup>[5]</sup>。

比较 Turbo-BLAST 和基于 R-STTC 的 SCSTC 发现: BLAST 利用所有发送天线传输信息, 没有在空间引入冗余, 具有最大的空间复用度; 而 R-STTC 的设计目标是获得满分集增益, 主要利用空间资源传输冗余信息, 它的信息速率只与所采用的调制方式有关, 与发送天线数和编码器状态数无关。因此, 在发送天线数和调制阶数相同的前提下, Turbo-BLAST 具有更高的频谱效率。另一方面, BLAST 解调器的 EXIT Chart 曲线总是与外码的 EXIT Chart 曲线相交, 对迭代译码性能产生影响, 虽然采用反格雷映射在一定

程度上对性能有所改善, 但一般需要设计纠错能力较强的外码。而 R-STTC 中固有的递归结构保证对应 SCSTC 在迭代译码时必然存在一个门限, 当系统信噪比大于该门限值时, 译码错误概率可随着码长和迭代次数增加趋近于零。因此, 在频谱效率相同的前提下, 基于 R-STTC 的串行级联空时码将具有相对较好的收敛性。

本文结合 STTC 和 BLAST 的优点, 通过简单分析多输入多输出系统(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)中分集增益和复用增益之间的折中关系, 突破原有 R-STTC 编码器中所采用递归卷积码的个数及码率的限制, 使用多个码率可灵活变化的系统递归卷积码设计了一类适用于串行级联结构的低复杂度广义递归网格空时码(G-RSTTC), 在调制方式不变的前提下, 可使传输速率随发送天线数的增加而线性增加, 同时可确保获得一定的分集增益。

### 2 递归 STTC 基本知识

设某一空时编码系统在准静态衰落信道下所能达到的发送分集增益为  $r$ , 则有

**定理 1**<sup>[6]</sup> 设一 MIMO 系统有  $N$  根发送天线,  $M$  根接收天线, 且所能达到的分集增益为  $rM$ , 若采用的调制方式中包含  $2^b$  个信号星座点, 则该 MIMO 系统所能达到的传输速

2005-11-15 收到, 2006-05-31 改回

国家自然科学基金资助项目(60502046)和西安电子科技大学研究生创新基金资助课题

率为

$$R \leq \frac{\log(A_{2^{bL}}(N, r))}{L} \text{ (bps/Hz)} \quad (1)$$

其中  $L$  为该空时编码系统的帧长,  $A_{2^{bL}}(N, r)$  表示码长为  $N$ , 最小汉明距离为  $r$  的码字个数<sup>[6]</sup>。由式(1), 当  $r=N$  时, 该空时编码系统所能获得的最大空间分集增益为  $MN$ , 同时传输速率满足  $R \leq b$  bps/Hz; 而当  $r=1$  时, 该空时编码系统所能获得的最大空间集增益为  $M$ , 且有  $A_{2^{bL}}(N, 1) = 2^{bLN}$  和  $R \leq bN$  bps/Hz。

对定理 1 的分析表明: 当所设计空时编码方案的分集增益由  $MN$  降低至  $M$  时, 其传输速率可由  $b$  bps/Hz 提高至  $bN$  bps/Hz, 即可通过降低分集增益来提高传输速率。但现有文献提供的 R-STTC 设计方法, 往往是在最大空间分集增益的基础上优化编码增益, 采用的编码器结构如图 1 所示: 当采用的调制方式中包含  $2^b$  个信号星座点时, R-STTC 编码器包括  $v$  个移位寄存器和  $b$  个码率为  $1/v_i$  的非系统递归卷积码, 其中  $v_i$  表示第  $i$  个卷积码的移位寄存器数, 且有  $v = v_1 + \dots + v_b$ 。为保证最大分集增益, 传统 R-STTC 编码器中至少包含  $b$  个移位寄存器, 且所能达到的传输速率只能由调制方式确定。为提高 R-STTC 的传输速率, 必须增加信号星座点个数, 这又会使 R-STTC 的编译码复杂度增加。

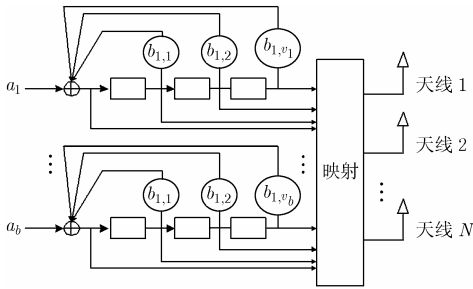


图 1 R-STTC 的编码器结构

考虑到在串行级联结构中, 可以利用二进制纠错码来改善系统的分集增益, 本文利用定理 1 的结果, 设计一类适用于串行级联结构的低复杂度广义递归 STTC, 在保证调制方式不变的前提下, 以一定的分集增益为代价使系统的传输速率可灵活变化。

### 3 G-RSTTC 的设计

#### 3.1 G-RSTTC 的基本编码器结构

本文设计的 G-RSTTC 编码器结构如图 2 示, 数据序列

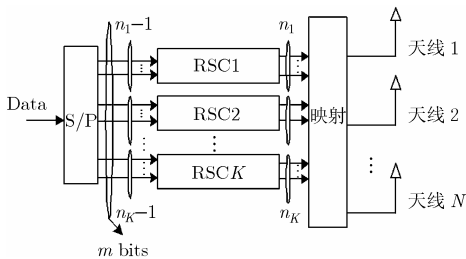


图 2 G-RSTTC 基本编码器结构

经串并转换分成  $m$  个并行的子信息流, 将这  $m$  个子信息流分成  $K$  组, 每组送入相应的两状态系统递归卷积编码器 (Recursive Systematic Convolutional code, RSC), 最后将各卷积码的编码输出映射为  $N$  个符号, 并由  $N$  根天线发送出去。由该编码过程可知, G-RSTTC 的传输速率为  $m$  bps/Hz, 令第  $k$  个 RSC 码的码率为  $(n_k - 1)/n_k$ , 则有

$$\sum_{k=1}^K (n_k - 1) = m \quad (2)$$

为保证足够的分集增益, 令

$$\sum_{k=1}^K n_k = m + K \leq Nb \quad (3)$$

利用式(2)和式(3), 可得  $K \leq Nb - m$ , 且任意满足式(3)的  $n_k (k=1, 2, \dots, K)$  都可作为 RSC 的参数。

比较图 1 和图 2, 可将 R-STTC 看作是 G-RSTTC 的一种特殊形式, 且 G-RSTTC 有以下特点:

(1) R-STTC 采用非系统递归卷积码, 每个卷积码在每个时刻只接收一个信息比特, 最大信息速率只有  $b$  bps/Hz; G-RSTTC 采用系统递归卷积码, 每个卷积码在每个时刻可同时接收多个信息比特, 信息速率可在  $b$  bps/Hz 至  $Nb-1$  bps/Hz 之间变换。

(2) R-STTC 中卷积码的个数由所采用的调制方式决定, 即若调制方式为  $2^b$ , 则 R-STTC 中仅有  $b$  个卷积码; G-RSTTC 中采用的卷积码个数与调制方式、信息速率和发送天线数有关, 可灵活多变。

(3) 达到同样的信息速率前提下, G-RSTTC 具有更低的复杂度。要达到 3bps/Hz 的信息速率, R-STTC 必须采用 8PSK 调制, 且编码器状态数至少等于 8, 对应 R-STTC 的 Trellis 图中有 64 条分支; 图 2 中利用一码率为  $3/4$  的两状态卷积码所设计的 G-RSTTC, 采用 4PSK 调制可达到同样的信息速率, 对应 Trellis 图中有 16 条分支, 复杂度仅为 R-STTC 的  $1/4$ 。

#### 3.2 G-RSTTC 中的卷积编码形式

确定 G-RSTTC 的基本编码结构之后, 可通过设计每个递归卷积码的参数和编码比特与发送符号之间的映射规则来提高 G-RSTTC 的性能。本文采用如图 3 所示的两状态卷积码, 生成多项式可表示为

$$\begin{pmatrix} 1 & D/(1+D) \\ 1 & D/(1+D) \\ \vdots & \vdots \\ 1 & D/(1+D) \end{pmatrix} \quad (4)$$

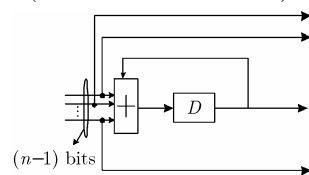


图 3 码率为  $(n-1)/n$  的系统递归卷积码

### 3.3 编码比特与发送符号之间映射规则

令  $\mathbf{a}_k = (a_{k,0}, a_{k,1}, \dots, a_{k,n_k-1})$  表示第  $k$  个 RSC 码的编码器输出比特, 其中  $a_{k,n_k-1}$  为该 RSC 码的校验比特, 其余为信息比特, 则编码比特与发送信号之间的映射关系为

$$(d_t^1, d_t^2, \dots, d_t^N) = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_K) \mathbf{G} \quad (5)$$

其中  $d_t^i$  将调制成二维复信号, 并由天线  $i$  发送出去,  $\mathbf{G}_{(m+K) \times N}$  为 G-RSTTC 的生成矩阵, 决定编码比特与发送符号之间的映射关系, 且  $\mathbf{G}$  中的每个元素可从集合  $\{0, 1, 2, \dots, 2^b-1\}$  中选取。

生成矩阵  $\mathbf{G}$  的选取直接影响 G-RSTTC 的性能, 下面给出本文采用的选取方法。

由图 2, 当 G-RSTTC 中采用的卷积码码率大于  $1/2$  时, 对应 G-RSTTC 的状态转移图中将存在并行分支, 且任意一对状态转移  $(S, S')$  之间将有  $2^{m-K}$  条并行分支, 可推出下述引理 1。

**引理 1** 设 G-RSTTC 任意一对状态转移  $(S, S')$  之间的并行分支对应的输入序列集合为  $\{w_0, w_1, \dots, w_{2^{m-K}-1}\}$ , 则该集合中任意两个元素之间的汉明距离始终为偶数, 且最大汉明距离  $d_{\max} = m(m$  为偶数) 或  $d_{\max} = m-1(m$  为奇数)。

根据引理 1, 得到基于 G-RSTTC 的 SCSTC 的分集增益特性如下。

**定理 2** 假设二进制纠错码作为外码与图 2 所示 G-RSTTC 构成串行级联空时码, 且外码与 G-RSTTC 之间通过均匀交织器(Uniform Interleaver)连接, 则当外码的最小汉明距离满足  $d_f^o > d_{\max}$  时, 所述串行级联空时码在独立衰落信道下获得的空间分集增益至少为  $2M$ , 其中  $M$  为接收天线数(证明见附录)。

由定理 2, 当外码满足  $d_f^o > d_{\max}$  且接收天线数  $M \geq 2$  时, 该串行级联码在独立衰落信道下至少可获得  $2M \geq 4$  的分集增益, G-RSTTC 的映射规则可按照文献[7]提出的迹原则进行搜索, 此时 SCSTC 的成对错误概率可近似为<sup>[7]</sup>

$$P(\mathbf{X} \rightarrow \hat{\mathbf{X}}) \leq \frac{1}{4} \exp\left[-M \frac{E_s}{4N_0} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^L |x_t^i - \hat{x}_t^i|^2\right] \quad (6)$$

### 3.4 G-RSTTC 设计举例

由上述讨论, 可通过两个步骤完成 G-RSTTC 的设计: 首先根据 G-RSTTC 的发送天线数和要求的速率, 由式(2)和式(3)确定递归卷积码个数和每个卷积码的码率; 然后由迹距离准则搜索 G-RSTTC 的生成矩阵。

**例** 当发送天线数  $N=2$  且采用 4PSK 调制时, 根据速率的不同要求, 可得到以下几种 G-RSTTC:

(1) 当  $m=2$  bps/Hz 时, 由式(2)和式(3)可得  $K \leq 2$ , 可采用一个码率为  $2/3$  的递归卷积码或两个  $1/2$  码率的递归卷积码来构造 G-RSTTC, 搜索结果分别对应表 1 中的 G-RSTTC1 和 G-RSTTC2, 其中 G-RSTTC1 的 Trellis 复杂度为 G-RSTTC2 的一半。

(2) 当  $m=3$  bps/Hz 时, 由式(2)和式(3)可得  $K \leq 1$ , 可采用一个码率为  $3/4$  的递归卷积码来构造 G-RSTTC, 搜索得到表 1 中的 G-RSTTC3。

表1 采用4PSK调制、不同码率的G-RSTTC生成矩阵

	生成矩阵	$N, m, b$	$K, n_k$
G-RSTTC1	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}^T$	2, 2, 2	1, $n_1=3$
G-RSTTC2	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix}^T$	2, 2, 2	2, $n_1=n_2=2$
G-RSTTC3	$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}^T$	2, 3, 2	1, $n_1=4$

由该例可看出: 所设计 G-RSTTC 的最大特点是允许 Trellis 图中有并行分支, 从而使频谱效率可在  $b$  bps/Hz 与  $Nb-1$  bps/Hz 之间灵活变化, 不再受调制方式的制约, 且由 G-RSTTC 与适当信道编码构成的串行级联结构在独立衰落信道下可获得至少  $2M$  的分集增益。事实上, 仿真结果表明, 与采用可获得最大分集增益的 R-STTC 构成的 SCSTC 相比, 只要外码纠错能力足够强, 由 G-RSTTC 构成的 SCSTC 在独立衰落信道下的分集增益损失几乎可忽略。

## 4 仿真与性能分析

图4比较了4种级联码在独立衰落信道下的性能, 为消除突发错误的影响, 内外码之间由长度为2048的随机交织器连接, 且  $C_1, C_2$  和  $C_3$  采用  $1/2$  码率, 生成多项式为(1,3)的2状态卷积码作为外码, 内码分别为 G-RSTTC1, G-RSTTC2 和文献[2]中基于延时分集构造的递归 STTC(DR-STTC);  $C_4$  采用生成  $1/2$  码率, 生成多项式为(5, 7)的状态卷积码为外码, G-RSTTC1 为内码。4个级联码的频谱效率均为 1 bps/Hz,  $C_1$  的编译码复杂度最低, 其他3个码的复杂度基本相同。由图4可知: G-RSTTC1 和 G-RSTTC2 的容量高于 DR-STTC。级联码  $C_1$  的分集增益略低于其他3个级联码, 这是因为 G-RSTTC1 仅包含一个码率为  $2/3$  的两状态卷积码, 对应的 Trellis 图中必然包含并行分支, 当外码纠错能力较弱时, 整个级联码的性能将会有所损失。但当 G-RSTTC1 与一个纠错能力较强的 4 状态卷积码构成串行级联结构时, 不仅分集增益几乎没有损失, 还比  $C_3$  有接近 0.8dB 的编码增益。

该结果表明: 对于纠错能力相对较弱的空时码, 只要该码在给定速率下有较高的信道容量, 同时采用一个较好的外码与之实现匹配, 对应级联码也可获得较好的性能。

采用  $N$  根发送天线和  $2^b$  阶调制时, V-BLAST 的频谱效率为  $Nb$  bps/Hz, 可获得最大的复用度, 但没有分集增益。若所设计的 G-RSTTC 仅采用一个卷积码, 信息速率可达  $Nb-1$  bps/Hz, 比 V-BLAST 损失了一个比特的信息, 但递归形式的引入使 G-RSTTC 可获得额外的分集增益和编码增益。图 5 比较了级联码  $C_5, C_6$  和  $C_7$  在准静态和独立衰落

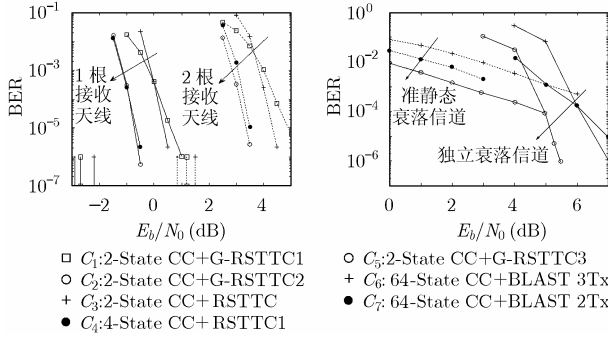


图 4 独立衰落信道,  $N=2, M=1$ 或 $2$

图 5 与 Turbo-BLAST 的性能比较

信道下的性能。 $C_5$ 的外码为 1/2 码率、生成多项式为(5,7)的 4 状态卷积码,内码为G-RSTTC3。由于G-RSTTC3 对应的Trellis图中有 16 分支,级联码 $C_5$ 的复杂度与采用BCJR译码算法的 32 状态卷积码基本相同。 $C_6$ 的内码为采用BPSK调制的 3 发送天线BLAST,  $C_7$ 的内码为采用 4PSK调制的 2 发送天线BLAST,  $C_6$  和 $C_7$ 的外码采用 1/2 码率、生成多项式为(554, 744)的 64 状态卷积码。此时,  $C_5, C_6$ 和 $C_7$ 的编译码复杂度基本相同,  $C_5$ 和 $C_6$ 的信息传输速率均为 1.5bps /Hz,  $C_7$ 的信息传输速率为 2bps/Hz。译码时, 所有系统都采用 5 次迭代。

由图 5 可看出: 在独立衰落信道下(实线),  $C_5$ 可获得更高的编码增益和分集增益。由于在准静态衰落信道下, 系统所能提供的最大空间分集增益为 $NM$ , 因此仿真中级联码 $C_5$ 和 $C_7$ 采用 3 根接收天线,  $C_6$ 采用 2 根接收天线, 这样可保证对应系统所能提供的最大空间分集增益均为 6。由图 5 知, 级联码 $C_5$ 的性能曲线斜率大于 $C_6$ , 与 $C_7$ 的几乎相同。与 $C_6$ 相比,  $C_5$ 有接近 1dB的编码增益; 与 $C_7$ 相比,  $C_6$ 有超过 3dB的编码增益。

### 5 结束语

为获得天线分集增益和空间复用增益的折中, 本文采用多个不同码率的两状态系统递归卷积码, 设计了一类适用于SCSTC的广义递归网格空时码。与传统的递归STTC相比, 本文给出的G-RSTTC具有更高、更灵活的信息速率; 码率相同时, 利用G-RSTTC构造的级联码有更低的译码复杂度和更强的抗衰落性能。与Turbo-BLAST系统相比, 在相同信息速率和复杂度前提下, 利用G-RSTTC构造的级联码可获得额外的编码增益和分集增益。

### 附录

#### 定理2证明

设 $\mathbf{X}$ 为发送信号矩阵, 接收端将其误判为 $\widehat{\mathbf{X}}$ , 则在独立衰落信道下, 它们之间的成对错误概率为<sup>[6]</sup>

$$P(\mathbf{X} \rightarrow \widehat{\mathbf{X}}) \leq \left( \prod_{t \in \rho(\mathbf{X}, \widehat{\mathbf{X}})} |\mathbf{x}_t - \widehat{\mathbf{x}}_t|^2 \right)^{-M} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-\delta M} = \Lambda^{-M} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-\delta M} \quad (\text{A-1})$$

由一致界概念, 该级联码的误帧率为

$$P_f = \sum_{\mathbf{X}} P(\mathbf{X}) \sum_{\widehat{\mathbf{X}}, \widehat{\mathbf{X}} \neq \mathbf{X}} P(\mathbf{X} \rightarrow \widehat{\mathbf{X}}) \quad (\text{A-2})$$

利用文献[8]中关于重量枚举函数的概念, 式(A-2)可进一步写为

$$P_f \leq \sum_{\mathbf{X}} P(\mathbf{X}) \sum_{w=w_m^o}^{L'R_C} \sum_{A=A_{\min}}^{A_{\max}} \sum_{\delta=\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} A_{w,A,\delta}^C \Lambda^{-M} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-\delta M} \quad (\text{A-3})$$

其中, 由文献[1],  $L'$ 为交织器长度, 外码码率 $R_C = k/p$ ,  $A_{w,A,\delta}^C$ 是所有满足以下条件的码矩阵 $\mathbf{X}'$ 的个数: (1) 与码矩阵 $\mathbf{X}$ 构成的差矩阵 $\mathbf{X} - \mathbf{X}'$ 的非零列数为 $\delta$ , 积距离为 $A$ ; (2) 码矩阵 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{X}'$ 对应的信息序列之间的汉明距离为 $w$ 。 $A_{w,A,\delta}^C$ 可由 $A_{w,l,n^o}^{C_o}$ 和 $A_{l,A,\delta,n^i}^{C_i}$ 估算, 其中 $A_{w,l,n^o}^{C_o}$ 是所有满足以下条件的码矩阵 $\mathbf{X}'$ 的个数: 对应 $\mathbf{X}'$ 的信息序列与对应 $\mathbf{X}$ 的信息序列之间的汉明距离为 $w$ , 两个信息序列经外码编码后的汉明距离为 $l$ , 且由 $n^o$ 个错误事件级联构成;  $A_{l,A,\delta,n^i}^{C_i}$ 是所有满足以下条件的码矩阵 $\mathbf{X}'$ 的个数: 在进行G-RSTTC编码之前, 对应 $\mathbf{X}'$ 的序列与对应 $\mathbf{X}$ 的序列之间的汉明距离为 $l$ , 码矩阵 $\mathbf{X}'$ 与 $\mathbf{X}$ 之间乘积距离为 $A$ , 差矩阵非零列数为 $\delta$ , 且由 $n^i$ 个错误事件级联构成。式(A-3)等价于<sup>[1,8]</sup>

$$P_f \leq \sum_{\mathbf{X}} P(\mathbf{X}) \cdot \sum_{w=w_m^o}^{L'R_C} \sum_{A=A_{\min}}^{A_{\max}} \sum_{\delta=\delta_{\min}}^{\delta_{\max}} \sum_{l=d_f^o}^{L'} \sum_{n^o=1}^{n_m^o} \sum_{n^i=1}^{n_M^i} B \cdot A_{w,l,n^o}^{C_o} A_{l,A,\delta,n^i}^{C_i} \Lambda^{-M} \left( \frac{E_s}{4N_0} \right)^{-\delta M} \quad (\text{A-4})$$

其中  $B = \binom{L'/p}{n^o} \binom{L'/p}{n^i} / \binom{L'}{l}$ ,  $d_f^o$ 是外码输出的最大自由距离, 由于交织器不改变序列的汉明重量, G-RSTTC 所有输入序列之间的最小汉明距离也为 $d_f^o$ 。因此, 当 $d_f^o > d_{\max}$ 时, 由引理 1, G-RSTTC 任意两个输入序列对应的码矩阵的差至少有两列不为 0, 即 $\delta_{\min} \geq 2$ 。从而, 该串行级联结构在独立衰落信道下获得的分集增益至少为 $2M$ , 其中 $M$ 为接收天线数。

### 参考文献

- [1] Lin Xiaotong and 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.
- [2] 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.
- [3] Bauch G. Concatenation of space-time block codes and turbo-TCM, in Proc. IEEE ICC'99, Vancouver, Canada, 1999: 1202-1206.
- [4] Tonello A M. Space-time bit-interleaved coded modulation with an iterative decoding strategy, in Proc. IEEE VTC'2000, Boston, USA, 2000: 473-477.

- [5] Zelst A V, Nee R V, and Awater G. A. Turbo-BLAST and its performance, in Proc. IEEE VTC'2001, Rhodes, Greece, 2001: 1282–1286.
- [6] Tarokh V, Seshadri N, and Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance criterion and codes construction. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1998, 44(2): 744–765.
- [7] Yuan J, Chen Z, Vucetic B, and Firmanto W. Performance and design of space-time coding in fading channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 2003, 51(12): 1991–1996.
- [8] Benedetto S. *et al.* Serial concatenation of interleaved codes: Performance analysis, design, and iterative decoding. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1998, 44(3): 909–926.
- 李颖: 女, 1973 年生, 副教授, 主要研究方向为 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, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信道编码、信息理论和信息安全等.