

# 网格空时码在 WCDMA 中的解决方案

李颖,王新梅

(西安电子科技大学 ISDN 国家重点实验室,陕西西安 710071)

**摘要:** 本文根据 STTD 向下兼容的特点,提出一种网格空时码在 WCDMA 中的解决方案,并给出一组适用于该方案的 STTC 编码.研究表明,在 WCDMA 系统中采用本文给出的编码方式,不仅能够具有与空时传输分集(STTD: Space-Time Transmit Diversity)相同的向下兼容特性,而且能够获得更好的抗衰落性能.

**关键词:** 码分多址; 网格空时编码调制; 空时传输分集

**中图分类号:** TN911. 22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 05-0772-04

## The Solution Scheme of Space-Time Trellis Code for WCDMA

LI Ying, WANG Xin-mei

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

**Abstract:** Based on the backward compatibility requisition, a new solution scheme of space-time trellis code for Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) system is proposed. Utilizing the space-time trellis code (STTC) proposed, WCDMA system has the same backward compatibility characteristics as space-time transmit diversity (STTD) does, and improved performance is also obtained compared with STTD.

**Key words:** CDMA; space-time trellis code; space-time transmit diversity

### 1 引言

作为提高无线通信系统传输速率的一种有效解决方法,空时编码技术在宽带 CDMA 系统中的应用是目前人们普遍关注的一个研究课题.文[1,2]分别提出了分层空时码(LST, Layered Space-Time)和分组空时码(SIBC, Space-Time Block Code)在 WCDMA 中的解决方案.文[1]将多码传输技术融入到 LST 中,获得了较高的传输速率,但 LST 对收发天线数的限制使其在移动环境中很难得到应用.文[2]给出的 STTD 方案在抗衰落性能方面优于 3G 中其他几种传输分集技术,同时具有向下兼容特性,但其编码增益仅与信号星座图的结构有关,无法进一步优化,很难进一步提高系统的抗衰落性能.

网格空时编码(STTC, Space-Time Trellis Code)是基于传输分集和编码调制技术的一种空时编码方式<sup>[3]</sup>,不仅具有较大的编码增益优化空间,而且对不同信道环境均具有一定自适应特性,将其应用于 WCDMA 系统会有更大的发展空间.设计 STTC 在 WCDMA 中的解决方案时,主要考虑以下两个问题:一是如何实现向下兼容性,即要求不支持空时分集服务的移动终端在该环境下仍可以正常通信,在目前 GSM 和 WCDMA 共存的过渡时期,这一要求是必须的;二是如何提高系统性能,采用传输分集技术的 WCDMA 系统实际可看作普通信道编码(卷积码或 Turbo 码)与空时编码构成的串行级连空时编码系

统,而原来基于优化误帧率原则得到的 STTC 好码在串行级连系统无法获得同样好的性能<sup>[4]</sup>.因此,为保证基于 STTC 技术的 WCDMA 系统在满足向下兼容要求的前提下获得更好的抗衰落性能,需要寻找新的编码方式和优化方法.

本文首先介绍关于 STTC 的基本知识,然后给出 STTC 在 WCDMA 中的解决方案,研究能满足系统向下兼容要求的 STTC 生成矩阵特点,并基于误比特的优化准则给出能提高 WCDMA 系统性能的 STTC 编码方式,结果表明:本文所给基于 STTC 的解决方案可获得更好的性能.

### 2 预备知识

设发送端有  $n$  根天线,则传输速率为  $R$  bit/s 的 STTC 可表示为:

$$(c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t)) = aG \quad (1)$$

其中

$$a = (a_{t,1}, \dots, a_{t,R}, a_{t-1,1}, \dots, a_{t-M+1,R}) \quad (2)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{R1} & g_{R2} & \dots & g_{Rn} \\ g_{(R+1),1} & g_{(R+1),2} & \dots & g_{(R+1),n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{MR,1} & g_{MR,2} & \dots & g_{MR,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

输出向量  $c(t) = (c_1(t), c_2(t), \dots, c_n(t))$  中的每一元素分别映射为信号星座图中的一点,并从  $n$  根天线上同时发送出

去. 在每一时隙  $t$ , 输入比特序列为  $a_{t,1}, \dots, a_{t,R}$ , 编码器的状态由  $(a_{t-1,1}, \dots, a_{t-M+1,R})$  决定. 采用 QPSK 调制时 ( $R=2$ ), 若  $M=2$ , 对应 STIC 编码器为 4 状态; 若  $M=3$ , 则对应 STIC 编码器为 16 状态, 此时去掉  $G$  中一行即对应 8 状态编码器.

若 STIC 的码长为  $L$ , 则所有  $L$  个  $c(t)$  构成码矩阵  $C$ . 设接收端将发送的  $C$  错判为  $E$ , 则  $C$  和  $E$  之差构成矩阵  $B(C, E)$ <sup>[3]</sup>:

$$B(C, E) = \begin{pmatrix} c_1(0) - e_1(0) & c_2(0) - e_2(0) & \dots & c_n(0) - e_n(0) \\ c_1(1) - e_1(1) & c_2(1) - e_2(1) & \dots & c_n(1) - e_n(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1(L-1) - e_1(L-1) & c_2(L-1) - e_2(L-1) & \dots & c_n(L-1) - e_n(L-1) \end{pmatrix} \quad (4)$$

若  $B(C, E)$  的秩为  $r$ , 矩阵  $A(C, E) = B^H(C, E) B(C, E)$  的非零特征值为  $\lambda_i (i=1, 2, \dots, r)$ . 假设不同收发天线对之间的信道衰落因子相互统计独立, 且均服从均值为零, 每维方差为  $1/2$  的复高斯分布, 则在准静态平坦衰落信道中, 成对错误概率  $P(C \neq E)$  的上限为<sup>[3]</sup>:

$$P(C \neq E) \leq \prod_{i=1}^r \left( \frac{1}{1 + \lambda_i E_b / 4N_0} \right)^m \quad (5)$$

其中信道中的加性噪声是均值为零, 每维方差为  $N_0/2$  的复高斯白噪声. 由式(5)可看出, 信噪比  $E_b/4N_0$  的幂次  $mr$  决定  $P(C \neq E)$  随信噪比增加而下降的速度, 文[3]称之为分集增益; 非零特征值之积  $\prod_{i=1}^r \lambda_i$  决定了  $P(C \neq E)$  在坐标轴中的位置, 且随  $\prod_{i=1}^r \lambda_i$  的增加而向左平移, 文[3]定义  $(\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_r)^{1/r}$  为编码增益. 若某一 STIC 所有可能的码矩阵  $B(C, E)$  对所对应矩阵都满秩, 则它在准静态平坦衰落下可获得系统所能提供的最大分集增益  $mr$ , 此时  $P(C \neq E)$  随信噪比增加而下降的速度最快. 因此, 为获得最佳的性能, 在选择 STIC 生成矩阵时, 首先要保证能获得系统提供的最大分集增益, 然后在此基础上提高编码增益.

STIC 的优化是目前比较重要的研究方向之一, 文[5~7]分别从不同角度进行了详细讨论. 除此之外, STIC 的应用也是不可忽视的一个研究方向, 文[8]研究了 STIC 在 GSM 系统中的解决方案, 以下研究 STIC 在 WCDMA 中的解决方案.

### 3 STIC 在 WCDMA 中的解决方案

#### 3.1 STID 在 WCDMA 中的解决方案

空时传输分集 (STID, Space-Time Transmit Diversity) 在 WCDMA 中的实现原理如图 1 所示<sup>[2]</sup>. 图中的编码序列和控制信息经 STID 编码、复用和扩频处理后, 由两根发射天线发送出去.

图中 STID 采用的编码矩阵为:

$$G = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 \\ c_2 & c_1^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

若采用 QPSK 调制, 则 STID 编码器将输入信息序列按照每 4 个比特一组进行划分, 同时将 4 比特信息映射为两个 QPSK 信

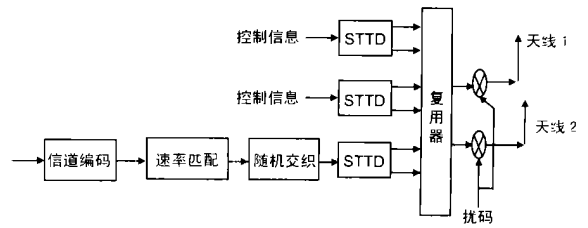


图 1 STID 在 WCDMA 中的实现原理

号点  $x_1$  和  $x_2$ , 并按照式(6)构成发送码矩阵, 其中  $G$  的第  $i (i=1, 2)$  列经第  $i$  根天线发送出去. 分析式(6)可知, STID 的第一根天线发送的信号实际是输入信息直接调制所对应的两个符号, 另一根天线发送的是这两个符号的共轭变换, 可看作是冗余信息, 因此 STID 实际可认为是一种符号意义上的系统码. 这样, 即使移动终端不支持发送分集业务, 也可只利用第一根天线发送的信号进行通信, 在目前传统 GSM 和 WCDMA 并存的过渡时期, 对 WCDMA 的这一要求是必须的, 我们称 STID 是向下兼容的. 设 STID 的矩阵为  $C$  和  $E$ , 它们对应矩阵  $A(C, E) = (|c_1 - e_1|^2 + |c_2 - e_2|^2)^2 I$ . 当 STID 采用的调制方式固定后,  $\min\{\det(A(C, E))\}$  的值也随之固定, 其中  $\det(A(C, E))$  为  $A(C, E)$  的行列式值, 是 STID 所有可能行列式值中的最小值. 因此, 虽然 STID 可获得系统提供的最大分集增益, 但其编码增益无法提高, 进一步提高系统的性能比较困难. 而 STIC 可在获得最大分集的前提下, 通过选择不同的生成矩阵进一步优化编码增益, 能更好的满足人们对移动通信越来越高的要求.

#### 3.2 STIC 在 WCDMA 中的解决方案

STIC 在 WCDMA 中的解决方案如图 2 示. 图中信道编码器的输出序列  $u$  在经过速率匹配和交织处理后, 与控制信息复用形成比特序列  $a$ .  $a$  在经 STIC 编码后分成两部分从两根天线发送出去. 同样, 考虑到过渡时期 GSM 和 WCDMA 并存的现状, 希望图 2 方案具有类似于 STID 的向下兼容性, 此时要求所选用的 STIC 也应是一种符号意义上的系统码.

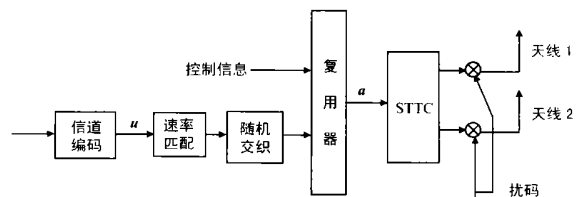


图 2 STIC 在 WCDMA 中的实现原理

若调制阶数为  $2^R$  的 STIC 生成矩阵  $G$  中第  $i$  列满足:

$$g_i = (1, 2, \dots, 2^R - 1, 0, 0, \dots, 0)^T \quad (7)$$

则对应的输出符号为:

$$x_i = a \cdot g_i = (a_{t,1} + 2a_{t,2} + \dots + (2^R - 1)a_{t,R}) \text{ mod } 2^R \quad (8)$$

不难发现, 此时第  $i$  根天线上发送的信号即是输入信息序列经直接调制后对应的信息符号序列, 其他天线的发送信号则是冗余信息. 因此, 满足式(7)的 STIC 也是一种符号意义上的系统码, 可实现类似于 STID 的向下兼容性. 这样我们在选择适用于图 2 系统的 STIC 生成矩阵时, 只需确定生成矩阵中的

其他几列元素,可大幅度缩小搜索范围.如果采用 QPSK 调制,且发射端有两根天线,则满足要求的所有可能 4 状态 STTC 生成矩阵将从原来的  $4^8 = 65536$  种缩小为  $4^4 = 256$  种,减少了 256 倍,而所有可能的 8 状态 STTC 生成矩阵将从原来的  $4^{10} = 1048576$  种缩小为  $4^5 = 1024$ ,减少了 1024 倍.

### 3.3 适用于 WCDMA 的 STTC 优化

由上节知,满足系统向下兼容要求的 STTC 应具有系统码形式.同时,考虑到图 2 所给方案实际是 STTC 与其他纠错码构成的串行级连系统,所以在选择 STTC 编码方式时应从串行级连系统的优化角度出发.但目前为止,串行级连空时编码系统的优化问题还是一个开放课题,很难从理论上得到系统完整的结果,虽然文[9]分析了影响串行级连空时编码系统性能的若干因素,但并没有从根本上解决这一问题,下面给出一种启发式的优化方法.以交织器作为参考点,将交织器前面的信道编码器称为外码,而将 STTC 编码器称为内码.为提高图 2 所示系统的性能,需综合考虑 STTC 与外码之间的匹配问题.一般来说,STTC 译码器输出的一帧数据中产生的错误比特数越少,外码越容易纠错,因此,在选择适用于 WCDMA 系统的 STTC 编码时,原来基于误帧率原则给出的优化方法将不再适用,我们给出一种基于误比特原则的优化方法.

根据联合界的概念,STTC 的误比特率可近似为<sup>[9]</sup>:

$$P_b(E) \approx \frac{c_e}{c_c} \frac{P(C \rightarrow E) P(C)}{L} \quad (9)$$

其中,  $c_c, c_e$  是分别对应于码矩阵 C、E 的输入比特序列之间的汉明距离, L 是码长.

设 STTC 编码器的状态数为  $2^v$ , 调制阶数为  $2^k$ , 则从状态转移图的某一时刻  $t$  出发,所有可能长度的错误事件构成的集合记为  $(e, t)$ , 长为  $l$  的所有可能错误事件构成的集合记为  $(e, l, t)$ , 则  $(e, l, t)$  中包含  $2^v (2^k)^l$  个元素.

由式(5)可看出:在收发天线数确定以后,STTC 的成对错误概率  $P(C \rightarrow E)$  仅与错误事件  $(C, E)$  对应的  $h$  值有关,所以可以按照  $h$  的不同将集合  $(e, l, t)$  划分成  $Q$  个互不相交的子集合  $(e, l, t, (q))$ , 每个子集合包含  $N(l, q)$  个元素,  $Q$  为  $(e, l, t)$  中错误事件对应的所有可能  $h$  值的个数,  $(q)$  为第  $q$  个  $h$  值.对每一个  $(e, l, t, (q))$ , 又可以按照  $c_e$  的不同分成  $W$  个互不相交的集合  $\phi(e, l, t, (q), w)$ , 每个集合中包含  $T(l, q, w)$  个元素,因此,由  $\phi(e, l, t, (q), w)$  引起误比特的概率为:

$$\frac{T(l, q, w)}{2^v (2^k)^l ( (q) )^m (E_b/N_0)^{mn} L} \quad (10)$$

所以,当码长  $L$  很大时,STTC 的误比特率近似为:

$$P_b \approx \frac{1}{k} \frac{T(l, q, w)}{2^v (2^k)^l ( (q) )^m (E_b/N_0)^{mn}} \quad (11)$$

令  $B(q) = \frac{1}{2^v} \frac{T(l, q, w)}{k (2^k)^l ( (q) )^m}$ ,  $h = E_b/N_0$ , 式(11)进一步写为:

$$P_b \approx \frac{B(q)}{k} \frac{1}{h^{mn} (q)^m} = \frac{1}{k} \frac{B(q)}{h^{mn} (q)^m} \quad (12)$$

令  $BS_m = \frac{1}{k} \frac{B(q)}{(q)^m}$ , 则式(12)可写为:

$$P_b \approx (1/h^{mn}) BS_m \quad (13)$$

由式(13)可看出:在码长和信噪比一定的前提下,STTC 的误比特率将主要由  $BS_m$  决定,  $BS_m$  越小,STTC 的性能越好.

因此,从式(7)和(13)知,适合于 WCDMA 系统的 STTC 应满足下面两个条件:(1)为满足系统兼容性要求,生成矩阵 G 中至少有 1 列具有式(5)的形式,即 STTC 应为系统码;(2)为提高系统性能,  $BS_m$  值应该尽可能小.

表 1 仿真中采用的 STTC 生成矩阵及相关参数

状态数	生成矩阵	编号	编码增益	$BS_1(3)$
8 state	$G_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 2 \end{pmatrix}^T$	STTC1	2	0.36310
4 state	$G_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}^T$	STTC2	2	0.905762

利用文[7]中的近似搜索算法,得到 8 状态 STTC1,生成矩阵为  $G_1$ ,表 1 同时给出了具有延时分集特性的 STTC2,生成矩阵为  $G_2$ .由表 1 知,STTC1 的编码增益与 STTC2 相同,但 STTC1 的值小于 STTC2,在图 2 所示方案中采用 STTC1 将会获得更好的抗衰落性能.

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 STTC 与 STTD 性能分析

由式(6)可知,STTD 的信号差矩阵为:

$$B(C, E) = \begin{pmatrix} c_1 - e_1 & -(c_2 - e_2)^* \\ c_2 - e_2 & (c_1 - e_1)^* \end{pmatrix}^T \quad (14)$$

式中“\*”为共轭转置.如果信号能量为 1,且采用 QPSK 调制,则矩阵  $A(C, E)$  的最小行列式值为 4,编码增益为 2,与 STTC1 和 STTC2 相同.假设系统采用两根发送天线,一根接收天线.图

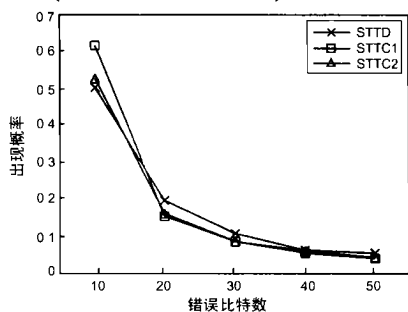


图 3 STTD 与 STTC 错误比特分布比较

3 给出表 1 中 STTC 和 STTD 当信噪比为 13dB、信息比特长为 260 比特时错误比特的分布情况.采用的信道环境为准静态平坦衰落信道,即信道衰落因子在一帧中保持不变,而在下一帧独立变化.

我们共统计 3000 个误帧得到图 3.由图 3 可看出:在所有 3000 个误帧中,STTC1 发生错误比特个数小于 10 的帧出现概率为 61%左右,STTD 发生错误比特数小于 10 的帧出现概率为 50%左右,略低于 STTC2.因此,当统计量足够大时,可以预计:STTC1 产生的误比特率将最小,STTD 最大.图 4 给出它们在准静态衰落信道下的误比特性能比较.

由图 4 知,在  $BER = 10^{-2}$  时,STTC1 的误比特性能比 STTC2 有近 1dB 的增益,比 STTD 有近 2dB 的增益.这也说明

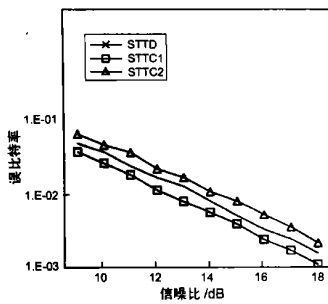


图 4 STTC 与 STTD 的误比特性能比较

文/3 中定义的编码增益仅可用来衡量空时码的误帧率大小,而无法衡量它们的误比特性能。因此,虽然表 1 中的空时码具有相同的编码增益,但 STTC1 的误比特率最小,更适合构成串行级连系统,在图 2 示 WCDMA 系统中将会获得更好性能。

#### 4.2 STTC 与 STTD 在 WCDMA 系统的性能比较

假设接收端可以准确估计信道特性(CSI),图 5 比较了 WCDMA 系统中分别采用 STTC 和 STTD 时的抗衰落性能,仿真环境如下:

(1)信道编码:码率为 1/3 的 8 状态 Turbo 码,分量码生成多项式为  $g_0(D) = 1 + D^2 + D^3$  和  $g_1(D) = 1 + D + D^3$ ; (2)调制方式:QPSK 调制; (3)信息比特长度分别为:640bits 和 1440bits,每帧占用时间为 10ms,则对应系统传输速率分别为 64kb/s 和 144kb/s; (4)扩频的码片速率为 3.84Mbps; (5)信道环境:终端移动速度为 3km/h,且接收端有两条可以区分路径,第 2 条比第 1 条延时 976ns,功率为第 1 条的 1/10。

图中的横坐标“信噪比”为每根接收天线上的信噪比,即  $SNR = nE_s/N_0$ ,其中  $n$  为发送天线数,  $E_s = 1$ 。

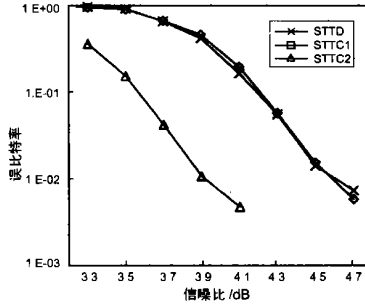
由图 5 可知:(1)WCDMA 系统采用 STTC1 可以获得相对更好的性能。当  $FER = 10^{-2}$  时,若信息比特长为 640bits,采用 STTC1 比采用 STTD 有大约 0.7dB 的增益;若信息比特长为 1440bits,则比采用 STTD 有 0.9dB 左右的增益。

(2)WCDMA 系统采用 STTC2 的性能只有在码长较长时才能显示出优势。当  $FER = 10^{-2}$  时,若信息比特长为 640bits,与采用 STTD 的性能基本相同;若信息比特长为 1440bits,则比采用 STTD 近 0.3dB 的增益。

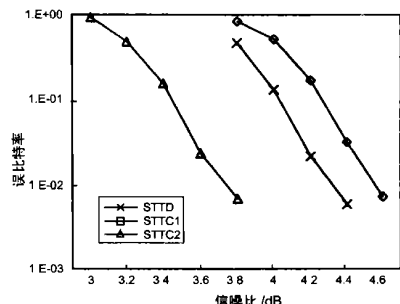
由 4.1 和 4.2 两部分仿真结果可知,由于 STTC1 在不级联情况下具有较好的错误比特分布特性,且误比特性能好于 STTC2 和 STTD,因而在本文所给 WCDMA 串行级联系统中获得了更好的抗衰落性能,且随着码长的增加,优越性更加明显。因此,外码纠错能力和内码错误比特分布的综合影响,是决定串行级联系统性能的一个关键因素。

#### 5 结论

本文论述了 STTC 在 WCDMA 中的解决方案,在满足系统向下兼容性要求的前提下,研究了相关 STTC 的选择问题,指出 STTC 错误比特分布特性和外码纠错能力之间的匹配是影响串行级联系统的一个关键因素。而影响串行级联系统的另一关键因素,即 STTC 与交织器之间的匹配问题的研究则是下



(a) 信息比特长为 640 比特时的误帧率比较



(b) 信息比特长为 1440 比特时的误帧率比较

图 5 基于 STTC 的解决方案与基于 STTD 的性能比较 一步的研究重点。

作者对深圳华为技术有限公司提供的基金资助表示感谢。

#### 参考文献:

- [ 1 ] H Huang ,H viswanathan ,GJ Foschini. Achieving high data rates in CDMA systems using BLAST techniques [ A ]. Proc. Globecom '99 [ C ]. Rio De Janeiro ,Brazil ,1999.
- [ 2 ] A Dabak ,S Hsuar ,R Negi. Space-time block coded transmit antenna diversity scheme for WCDMA [ A ]. Proc. WCNC '99 [ C ]. New Orleans ,Lous ,France ,1999.
- [ 3 ] V Tarokh ,N Seshadri ,A R Calderbank. Space-time codes for high data rate wireless communication :performance criterion and codes construction [ J ]. IEEE Trans. IT ,1998 ,44 (2) :744 - 765.
- [ 4 ] 李颖 ,吴克颖 ,王新梅 ,级连网格空时码性能研究 [ J ]. 西安电子科技大学学报 ,2002 ,29 (4) .
- [ 5 ] S Baro ,G Bauch A Hansman. Improved codes for space-time trellis-coded modulation [ J ]. IEEE Trans. Com. Letters ,2000 ,4 (1) :20 - 22.
- [ 6 ] Q Yan ,R S Blum. Optimum space-time convolution codes [ A ]. Proc. WCNC '2000 [ C ]. IEEE Communication Society ,Chicago ,IL USA ,Sept. 2000.
- [ 7 ] 李颖 ,王新梅 ,一种网格空时码优化的新方法 [ J ]. 电子学报 ,2002 ,30 (10) :1530 - 1532.
- [ 8 ] A F Naguib ,V Tarokh ,N Seshadri ,A R Calderbank. A space-time coding modem for high-data-rate wireless communications [ J ]. IEEE Trans. IT ,44 (8) :1459 - 1477.
- [ 9 ] Xiaotong Lin ,Rick S Blum. Guidelines for serially concatenated space-time code design in flat rayleigh fading channels [ A ]. Third IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications [ C ]. Taiwan ,China ,March ,2001. 247 - 250.

#### 作者简介:



李 颖 女,1973 年生于山东省菏泽县,1995 年毕业于西安电子科技大学通信工程学院,获学士学位,1998 年开始攻读硕士学位,现为西安电子科技大学博士研究生,主要研究方向为移动通信及信道编码技术。

王新梅 男,1937 年生,浙江人,西安电子科技大学教授,博士生导师,中国电子学会会士,长期从事信息论、编码和密码学方面的教学和科研工作。