

## 一种可变分集增益的空时/时频调制编码新方案

蒋慧娟<sup>①②</sup> 谭笑<sup>②</sup> 沈越泓<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

<sup>②</sup>(总参 63 研究所 南京 210007)

**摘要:** 将酉空时分组编码技术应用于时频调制系统中, 该文提出了一种可变发射分集增益的空时/时频调制编码新方案。将已调的时频信号分解为互正交的两子信号, 同时运用不同的排列组合方案即可得到不同的分集增益。计算机仿真结果表明, 新方案抗平坦衰落性能优于 Alamouti 空时分组编码方案及空时/频移键控编码方案, 且当新方案获得二重分集增益时, 其相应编码速率优于获得四重分集增益时的编码速率, 但抗衰落性能劣于获得四重分集增益时的性能, 所得结论与理论分析完全一致。

**关键词:** 空时/时频调制; 可变发射分集增益; 酉空时调制; 空时分组编码

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0979-04

## A Novel Scheme for Space-Time Block Coding with Variable Transmit Diversity Gain in Time-Frequency-Shift Keying Systems

Jiang Hui-juan<sup>①②</sup> Tan Xiao<sup>②</sup> Shen Yue-hong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Communication Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

<sup>②</sup>(The 63rd Research Institute, PLA General Staff Headquarters, Nanjing 210007, China)

**Abstracts:** A novel scheme for unitary space-time block coding with variable transmit diversity gain is proposed for TFSK (Time-Frequency-Shift Keying) systems. Each modulated TFSK symbol is divided into two orthogonal sub-symbols, and the new scheme is constructed by differently combining the sub-symbols with the different transmit diversity gain able to be achieved by noncoherent processing at the receivers. The results of computer simulation show that the new scheme has advantage of anti-flat-fading over Alamouti space-time block coding and space-time frequency-shift keying, and ST-TFSK systems with two diversity gain enjoy the superior coding rate and the inferior anti-fading performance to the ones with four diversity gain, which approve the theoretical analysis

**Key words:** Space-Time Time-Frequency-Shift Keying (ST-TFSK); Variable transmit diversity gain; Unitary space-time modulation; Space-time block coding

### 1 引言

空间作为一种进一步提高通信系统容量的资源, 目前引起了各国通信工作者的广泛关注<sup>[1,2]</sup>。其中空时分组编码(STBC)以其编译码简单等特点跻身于第三代无线通信系统标准之列<sup>[2-4]</sup>, 而酉空时调制则可在接收机未知信道信息的前提下达到相应的信道容量<sup>[5]</sup>。Geert等人提出的空时/频移键控(ST-FSK)技术有效地结合了两者的优点, 是一种特殊的酉空时分组码<sup>[6]</sup>。但ST-FSK抗多径、抗正弦单音等干扰的性能有限, 不宜直接运用于保密性要求高(如军事应用)的通信系统中。时频组合调制技术(或简称为时频调制TFSK)作为一种抗衰落性能良好的调制键控技术, 在衰落条件下, 较之FSK在抗多径、抗正弦干扰等性能上具有一定的优势, 因此在短波通信领域有着广泛的运用<sup>[7]</sup>。为了兼顾两者的优点, 可将酉空时分组编码技术应用于时频调制系统中, 即空时/时频调制(ST-TFSK)。绝大多数空时分组编码方案是以全发射分集增益为设计目标, 但在不同衰落环境下

通常也需要可变分集增益为无线通信提供稳定的服务质量<sup>[8]</sup>。故本文为空时/时频调制系统设计了一种可变发射分集增益的空时/时频调制编码方案。

鉴于多数多输入多输出(MIMO)系统采用 4 根发射天线和 1 根接收天线<sup>[9,10]</sup>, 所以本文将以此系统为例, 在平坦、慢瑞利衰落的信道条件下给出ST-TFSK的系统模型, 推导接收信号的非相干最大似然判决度量, 给出系统误码率的性能上界, 详细讨论可变分集增益的空时/时频调制编码方案, 最后用计算机仿真来检验理论推导的正确性。

为了叙述方便, 这里给出文中出现符号的含义:  $(\cdot)^T$ 为矩阵的转置,  $(\cdot)^H$ 为矩阵的共轭转置,  $(\cdot)^*$ 为取共轭。 $\|\cdot\|_F$ 表示Frobenius范数,  $[k]_p$ 为向量 $k$ 中第 $p$ 个元素,  $[A]_{m,n}$ 为矩阵 $A$ 中第 $m$ 行第 $n$ 列元素,  $I_N$ 是 $N \times N$ 的单位阵。

### 2 ST-TFSK 系统模型

假设系统采用  $M(M=4)$ 个发射天线和  $N(N=1)$ 个接收天线, 且工作在平坦、慢瑞利衰落信道条件下, 即在衰落周期  $T$ 内信道条件不变, 不同周期内衰落系数相互独立。鉴于实

际军用短波设备中通常采用4时4频制的时频调制,其抗正弦干扰的能力较2时2频制强,所以本文仅考虑4时4频制。其他制时频调制,可以据此类推。

信号经ST-TFSK调制的流程如图1所示。输入的二进制比特流依据Gray映射规则映射为 $K$ 进制( $K=4$ )的符号流 $k$ 。将符号流每 $P$ 个分为一块,记为矢量 $\mathbf{k}=[k_1, k_2, \dots, k_P]^T$ 。依据下文ST-TFSK映射规则将矢量 $\mathbf{k}$ 中 $P$ 个符号映射为一 $T \times M$ 的ST-TFSK块 $\mathbf{X}_k$ ,使之满足酉空时分组编码要求<sup>[5,10]</sup>,即 $\mathbf{X}_k$ 各列相互正交。发送信号的星座图为 $\mathbf{A}_X = \{\mathbf{X}_k | k \in A_K^{P \times 1}\}$ ,其中 $A_K = \{0, 1, \dots, K-1\}$ 。

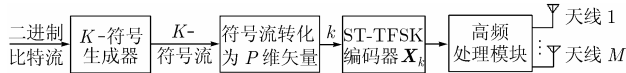


图1 ST-TFSK调制框图

为了数学分析简便,这里仅讨论等效低通信号通过等效低通信道的传输。接收信号的矩阵表示为 $\mathbf{Y} = \sqrt{\rho/M} \mathbf{X}_k \mathbf{H} + \mathbf{E}$ ,其中 $\rho$ 表示每个接收天线上抽样信号信噪比的数学期望值。 $\mathbf{Y}$ 为 $T \times N$ 的接收信号矩阵。 $\mathbf{E}$ 为 $T \times N$ 的加性噪声矩阵,且 $[\mathbf{E}]_{t,n} = e_{tn}$ 为零均值、单位方差的独立同分布的复高斯随机变量。 $\mathbf{H}$ 为 $M \times N$ 平坦衰落信道特性矩阵,且 $[\mathbf{H}]_{m,n} = h_{mn}$ 为从发射天线 $m$ 到接收天线 $n$ 的衰落系数,其概率分布服从 $p(h_{mn}) = 1/\pi \cdot \exp(-|h_{mn}|^2)$ 。

非相干最大似然(ML)检测使得接收机、发送机不需知道信道的具体信息,从而节省了信道估计模块的开支,简化了系统结构,降低了实现的复杂度。ST-TFSK的非相干ML判决度量可以表示为

$$\hat{\mathbf{k}} = \arg \max_{\mathbf{X}_k \in \mathbf{A}_X} p(\mathbf{Y}/\mathbf{X}_k) = \arg \max_{\mathbf{X}_k \in \mathbf{A}_X} \|\mathbf{X}_k^H \mathbf{Y}\|_F^2 \quad (1)$$

误块率 $P_e$ 可以通过一致边界(union bound)技术得到一个上界<sup>[5,6]</sup>,即

$$P_e \leq \frac{1}{4^2} \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{k}' \in A_K^{P \times 1}, \mathbf{k} \neq \mathbf{k}'} P_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} \quad (2)$$

其中 $P_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}$ 是将 $\mathbf{k}$ 错判为 $\mathbf{k}'$ 时的成对差错概率。鉴于ST-TFSK调制是种特殊的酉空时调制,所以可以直接运用文献[11]中的结论,即

$$P_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} \leq \mu_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}^2 \sum_{n=0}^{1} \binom{n+1}{n} (1 - \mu_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'})^n \quad (3)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} d_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} &= \left[ \prod_{m=1}^2 (1 - d_{\mathbf{k}, \mathbf{k}', m}^2) \right]^{1/2} \\ \gamma &= (\rho T / M)^2 / (1 + \rho T / M) \\ \mu_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{d_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} \cdot \gamma / (d_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'} \cdot \gamma + 4)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 3 可变分集增益的空时/时频调制编码方案

为了便于比较,这里首先简单介绍一下 $M=2, P=2$ 时的编码方案1。ST-TFSK调制系统若采用最简单的Alamouti空时分组编码<sup>[10,12]</sup>,即符号矢量 $\mathbf{k}=[k_1, k_2]^T$ 经过空时/时频编

码器后得到下述2行2列的空时频调制编码矩阵:

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} s_{[k_1]} & s_{[k_2]} \\ -s_{[k_2]} & s_{[k_1]} \end{bmatrix} \quad (5)$$

这里 $T=4PK$ 。其中 $s_k$ 为4时4频信号的等效低通离散形式,即

$$\begin{aligned} s_0(n) &= \begin{cases} f_0(n), & n = 0, \dots, 3 \\ f_1(n-4), & n = 4, \dots, 7 \\ f_2(n-8), & n = 8, \dots, 11 \\ f_3(n-12), & n = 12, \dots, 15 \end{cases} \\ s_1(n) &= \begin{cases} f_1(n), & n = 0, \dots, 3 \\ f_2(n-4), & n = 4, \dots, 7 \\ f_3(n-8), & n = 8, \dots, 11 \\ f_0(n-12), & n = 12, \dots, 15 \end{cases} \\ s_2(n) &= \begin{cases} f_2(n), & n = 0, \dots, 3 \\ f_3(n-4), & n = 4, \dots, 7 \\ f_0(n-8), & n = 8, \dots, 11 \\ f_1(n-12), & n = 12, \dots, 15 \end{cases} \\ s_3(n) &= \begin{cases} f_3(n), & n = 0, \dots, 3 \\ f_0(n-4), & n = 4, \dots, 7 \\ f_1(n-8), & n = 8, \dots, 11 \\ f_2(n-12), & n = 12, \dots, 15 \end{cases} \end{aligned}$$

不难验证, $s_0(n), s_1(n), s_2(n)$ 和 $s_3(n)$ 是定义在 $l_{4K}^2(\mathcal{Z})$ 某子空间上的一组正交基,即每两个之间的内积均满足

$$\begin{aligned} \langle s_i(n), s_j(n) \rangle &= \sum_{n=0}^{15} s_i^*(n) \cdot s_j(n) = 4K \delta(i-j) \\ &= \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ 4K, & i = j, \end{cases} \quad i, j = 0, \dots, 3 \end{aligned}$$

而 $f_k$ 为4FSK信号的等效低通离散形式,即

$$\left\{ \mathbf{f}_k \mid \mathbf{f}_k = [1, e^{j2\pi k/K}, \dots, e^{j2\pi k(K-1)/K}]^T, k \in A_K \right\}$$

亦不难验证, $f_0(n), f_1(n), f_2(n)$ 和 $f_3(n)$ 是定义在 $l_K^2(\mathcal{Z})$ 某子空间上的一组正交基,即每两个之间的内积均满足

$$\langle \mathbf{f}_i(n), \mathbf{f}_j(n) \rangle = \sum_{n=0}^{K-1} \mathbf{f}_i^*(n) \cdot \mathbf{f}_j(n) = K \delta(i-j) = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ K, & i = j \end{cases}$$

显然,

$$\mathbf{X}_k^H \mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} s_{[k_1]} & s_{[k_2]} \\ -s_{[k_2]} & s_{[k_1]} \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} s_{[k_1]} & s_{[k_2]} \\ -s_{[k_2]} & s_{[k_1]} \end{bmatrix} = T \mathbf{I}_M$$

即 $\mathbf{X}_k$ 的列相互正交,满足酉空时分组编码设计要求<sup>[5]</sup>。

若发射天线数 $M=4, P=2$ ,则为了获得可变的发射分集增益,按奇偶时隙将4时4频信号的等效低通离散形式 $s_k$ 分解为长度与之相等的两部分,即 $s_k = s_k' + s_k''$ 。其中 $s_k'$ 的第1,3时隙与 $s_k$ 相等,而2,4时隙为零; $s_k''$ 的第2,4时隙与 $s_k$ 相等,而1,3时隙为零。显然, $s_k'$ 与 $s_k''$ 相互正交,即 $\langle s_k', s_k'' \rangle = [s_k']^H s_k'' = 0$ 。

将  $\mathbf{s}_k=[\mathbf{s}'_k, \mathbf{s}''_k]$  代入式(5)，经过换列整理，得到空时/时频调制编码方案 2，即

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} s'_{[k]_1} & s'_{[k]_2} & s''_{[k]_1} & s''_{[k]_2} \\ -s'_{[k]_2} & s'_{[k]_1} & -s''_{[k]_2} & s''_{[k]_1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

设

$$\mathbf{X}_{k'} = \begin{bmatrix} s'_{[k']_1} & s'_{[k']_2} & s''_{[k']_1} & s''_{[k']_2} \\ -s'_{[k']_2} & s'_{[k']_1} & -s''_{[k']_2} & s''_{[k']_1} \end{bmatrix}$$

表示另一码字，其中  $k \neq k'$ 。两个码字之间的码字差别矩阵为

$$\mathbf{B}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'}) = \begin{bmatrix} s'_{[k]_1} - s'_{[k']_1} & s'_{[k]_2} - s'_{[k']_2} & s''_{[k]_1} - s''_{[k']_1} & s''_{[k]_2} - s''_{[k']_2} \\ -s'_{[k]_2} + s'_{[k']_2} & s'_{[k]_1} - s'_{[k']_1} & -s''_{[k]_2} + s''_{[k']_2} & s''_{[k]_1} - s''_{[k']_1} \end{bmatrix}$$

由于  $k \neq k'$ ，因此  $\mathbf{B}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'})$  的秩  $r=2$ 。由于  $\mathbf{A}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'}) = \mathbf{B}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'}) \cdot \mathbf{B}^H(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'})$ ，因此  $\mathbf{A}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'})$  和  $\mathbf{B}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'})$  具有相同的秩。又因接收天线数  $N=1$ ，则这种方案获得的分集增益为 2。该编码方案与文献[8]中 4 发射天线时二重分集编码方案式(8)相比，编码时延降低了一半。

将  $\mathbf{s}_k = \begin{bmatrix} s'_k & s''_k \\ -s''_k & s'_k \end{bmatrix}$  代入式(5)，经过换行和换列整理，得

到另一空时/时频调制编码方案 3，即

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} s'_{[k]_1} & s'_{[k]_2} & s''_{[k]_1} & s''_{[k]_2} \\ -s'_{[k]_2} & s'_{[k]_1} & -s''_{[k]_2} & s''_{[k]_1} \\ -s''_{[k]_1} & -s''_{[k]_2} & s'_{[k]_1} & s'_{[k]_2} \\ s''_{[k]_2} & -s''_{[k]_1} & -s'_{[k]_2} & s'_{[k]_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

此时两个不同码字间的码字差别矩阵的秩  $r=4$ ，因此  $\mathbf{A}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'}) = \mathbf{B}(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'}) \cdot \mathbf{B}^H(\mathbf{X}_k, \mathbf{X}_{k'})$  的秩  $r=4$ 。若采用单根接收天线，则这种方案获得的分集增益为 4。该方案与文献[10]中 4 发射天线编码方案式(38)相比，编码时延降低了一半。

不难验证，在  $M=4$  的 ST-TFSK 调制系统中，上述空时/时频调制编码方案 2 与方案 3 均满足酉空时分组编码的条件，即  $\mathbf{X}_k^H \mathbf{X}_k = (T/2) \mathbf{I}_M$ 。

#### 4 MATLAB 仿真与性能比较

图 2 直观地比较了采用编码方案 1 时 ST-TFSK 和 ST-4FSK<sup>[6]</sup> 系统的误块率性能。当误块率为  $10^{-2}$  时，ST-TFSK 比 ST-4FSK 所需信噪比低约 6dB；当误块率为  $10^{-3}$  时，ST-TFSK 比 ST-4FSK 所需信噪比低约 5.6dB，提高了系统抗平坦衰落、抗高斯白噪声的性能。与此同时，ST-TFSK 系统误块率的性能上界较好地拟合了测得的仿真数据。

图 3 给出了系统误块率、误符号率及误比特率随信噪比 (SNR) 变化的蒙特卡罗 (Monte Carlo) 仿真曲线，较为直观地比较了 ST-TFSK 系统采用不同编码方案时抗衰落、抗高斯白噪声性能。其中仿真测得的误码数至少为 100，因此得到的仿真数据均有足够好的置信度，即均方根值偏差不大于 10%。当误符号率为  $10^{-3}$  时，方案 2 比方案 1 所需信噪比低

约 4.5dB，尽管两者分集增益相同；方案 3 比方案 2 所需信噪比低约 2.9dB，但这是以牺牲带宽有效性为代价的。

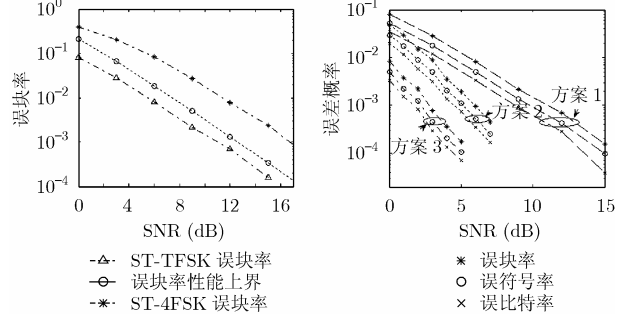


图 2 ST-TFSK 与 ST-4FSK 抗平坦衰落的性能比较 图 3 采用不同编码方案的 ST-TFSK 系统性能比较

定义空时编码速率  $\eta$  为编码器在输入时提取的符号数与每根天线发射的空时编码符号数之间的比率<sup>[2]</sup>，定义速率  $R = \log_2(|A_k^{P \times 1}|) / T = \eta \log_2 K / (4K)$  为每利用信道一次传输的比特数<sup>[6]</sup>。表 1 比较了文中提出的 3 种调制编码方案。对比方案 1 与方案 2，两者的分集增益和速率均相等，但由于方案 2 中每个时隙只有两个天线在工作，所以带来两者性能的差异。对比方案 2 与方案 3，尽管两者采用相同的发射天线数，但不同的编码方案导致了不同的分集增益和速率。相比于方案 2，方案 3 牺牲了部分带宽有效性，以换取功率有效性的提升。

表 1 不同空时/时频调制编码方案的比较

编码方案	发射天线数 $M$	$P$	$T$	分集增益	编码速率 $\eta$	速率 $R$
方案 1	2	2	32	2	1	1/8
方案 2	4	2	32	2	1	1/8
方案 3	4	2	64	4	1/2	1/16

#### 5 结束语

为了在不同的衰落环境下给无线通信提供稳定的服务质量，本文为 4 发射天线的空时/时频调制系统提供了一种可变分集增益的编码新方案，即采用方案 2 可以获得二重分集增益，采用方案 3 可以获得四重分集增益。当误符号率为  $10^{-3}$  时，方案 3 比方案 2 所需信噪比低约 2.9dB，但编码速率降低了一半；方案 2 比方案 1 所需信噪比低约 4.5dB。现有时频调制系统仅需稍加改造，就可升级为 ST-TFSK 系统，同时应用可变分集增益的编码方案即可适应不同衰落环境，因此具有较好的应用前景。

#### 参考文献

- [1] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Commun.*, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] Branka V and Jinhong Y 著, Space-Time Coding[M]. 王晓海等译. 北京: 机械工业出版社, 2004: 45-101.
- [3] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 529-537.

- [4] Proakis J G. Digital Communications[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1995, ch4.
- [5] Hochwald B M and Marzetta T L. Unitary space-time modulation for multiple-antenna communications in Rayleigh flat fading[J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 2000, 46(3): 543–564.
- [6] Geert L, Zhao W, and Georgios B G, *et al.* Space-time frequency-shift keying[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2004, 52(3): 346–349.
- [7] 沈琪琪, 朱德生. 短波通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1989: 132–145.
- [8] Guangliang R, Hui Z, and Chang Yilin. A novel scheme for space-time block coding with variable transmit diversity gain in OFDM systems. IEEE 6th CAS Symp. on Emerging Technologies: Mobile and Wireless Comm.. Shanghai, China, May 31–June 2, 2004: 631–634.
- [9] Tarokh V, Jafarkhani H, and Calderbank A R. Space-time results[J]. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1999, 17(3): 451–460.
- [10] Tarokh V, Jafarkhani H, and Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1999, 45(7): 1456–1467.
- [11] Li R and Kam P Y. New tight bounds on the pairwise error probability for unitary space-time modulations[J]. *IEEE Commun. Letters*, 2005, 9(4): 289–291.
- [12] Alamouti S M. A simple transmit diversity scheme for wireless communications[J]. *IEEE J. on Select. Areas Commun.*, 1998, 16(10): 1451–1458.
- 蒋慧娟: 女, 1978 年生, 博士生, 研究方向为软件无线电.
- 谭 笑: 男, 1978 年生, 硕士, 总参 63 研究所助理工程师, 研究方向为电磁场与微波技术.
- 沈越泓: 男, 1959 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字通信、软件无线电.