

一种新的酉空时调制¹

邹黎 赵玉萍 王兵 项海格 梁庆林

(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘要: 为了更有效地提高系统的频带利用率, 该文提出一种多调制方式联合的设计思想, 并推导出其实现的必要条件和几种可能途径. 由理论结果导出一种新的调制方式——差分相位酉空时调制 (DPUSTM), 并设计了相应的非相干解调算法. DPUSTM 将酉空时调制 (USTM) 和差分相移键控 (DPSK) 调制有机地融合, 在提高系统频带利用率方面比目前已有的 USTM 系统更简单易行. 可以较低的复杂度分别解调出酉空时 (UST) 信号和 DPSK 信号, 不仅保持了 UST 信号低误比特率的优点, 并可适用于多种速率并行传输的无线数据通信. 仿真结果证明理论分析和给出的设计是有效的, 而且表明了 DPUSTM 的性能可比 USTM 和 DSTM 更优越.

关键词: 多人多出系统 (MIMO), 酉空时信号, 酉空时调制, 差分空时调制

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1009-08

A Novel Unitary Space-Time Modulation

Zou Li Zhao Yu-ping Wang Bing Xiang Hai-ge Liang Qing-lin

(School of Electron. Eng. and Computer Science, Peking Univ., Beijing 100871, China)

Abstract In order to improve the spectral efficiency, this paper proposes a new framework for designing a modulation consisting of more than one modulation method. The new modulation method is able to provide better spectral efficiency while preserving the merits of Unitary Space-Time Modulation (USTM), such as low error rate and demodulation simplicity. The necessary condition for this set of modulations is presented and several different options satisfying the condition are given. Finally a novel modulation called Differential Phase Unitary Space-Time Modulation (DPUSTM) is designed as a special case. DPUSTM, which consists of USTM and Differential Phase-Shift Keying (DPSK) modulation, is not only easier to improve the spectral efficiency than USTM, but also simpler to demodulate. The novel modulation can achieve low bit error rate as UST signals and be exploited in multi-rate data communication. The simulation results not only verify the theoretical analysis, but also show that DPUSTM provides a better performance than USTM and DSTM.

Key words Multiple-Input-Multiple-Output(MIMO), Unitary space-time signals, Unitary Space-Time Modulation(USTM), Differential Space-Time Modulation(DSTM)

1 引言

在 MIMO 系统中有机地融合空时编码调制技术, 不仅能增加系统容量, 也能有效地提高系统在衰落信道下的性能增益, 为资源日益紧张的无线通信开辟了新的方向^[1]。目前大部分的研究都需要估计信道信息. 然而信道容量的增加迫使天线数递增, 移动速度的提高也加强了信道参数反馈的及时性的要求, 这些都将增大信道估计的复杂度和难度, 有时甚至使其不可实现^[2-4]。因此大家开始研究 MIMO 系统中的无信道估计的检测技术. 1999 年 B. M. Hochwald 等证明酉空时调制 (Unitary Space-Time Modulation, USTM) 系统可以采用非相干解调^[2,5],

¹ 2003-03-21 收到, 2003-06-05 改回

国家自然科学基金重大研究计划资助课题 (批准号: 90104014)

这个发现立刻引发了许多学者对 USTM 系统中的酉空时 (Unitary Space-Time, UST) 信号的研究兴趣。接着一套系统地设计 UST 信号的方法被提出^[6]。此后又发展出了一种基于群的 UST 信号结构。在慢衰落信道下, 还可采用差分空时调制 (Differential Space-Time Modulation, DSTM)^[3,4,7]。A. Shokrollahi 提出根据表示论 (Representation theory) 设计高频带利用率的 UST 信号^[8]。

目前的工作主要集中在通过设计 UST 信号星座图提高频带利用率, 这些工作为 UST 信号的丰富码集奠定了基础。本文从新的角度分析提高系统频带利用率的问题, 希望以 USTM 为基础融合多种调制方式, 且新增的调制方式不影响 UST 信号的正确解调。本文从理论上推导出这种新调制方式需要满足的必要条件和几种可能的途径, 并由理论结果给出一种复杂度较低的调制方式——差分相位酉空时调制 (Differential Phase Unitary Space-Time Modulation, DPUSTM)。DPUSTM 将 USTM 与 DPSK 调制有机地结合, 可以适用于任意 UST 信号以及多相位的 DPSK 信号。DPSK 信号使 UST 信号相位旋转, 但不影响 UST 信号的解调, 保留了 UST 信号的低误码率的优点, 同时提高了频带利用率。在另一方面, DPUSTM 系统对 UST 信号与 DPSK 信号分别采用非相干解调和差分解调, 可适用于多种速率并行传输的数据通信。

文章第 2 节介绍系统模型以及相关的调制方式, 在第 3 节提出一个提高频带利用率的新思路, 从理论上推导出新方案设计的必要条件, 并由理论结果导出一种新的调制方式——DPUSTM, 仿真结果和结论将分别在第 4、5 节给出。

2 系统模型及相关调制方式

2.1 系统模型

MIMO 系统包含了 M 根发射天线和 N 根接收天线。不同收发天线之间的子信道互相独立, 子信道为瑞利平稳衰落信道, 即信道传输系数符合复高斯分布, 且每个信道传输系数在 T 个符号周期保持不变, 于是信道模型可表示为矩阵 $H(M \times N)$ 。每根天线的平均发射功率相等。用 ρ 表示在每个接收天线输出端的信噪比的期望, 以每 T 个符号为一组, 在第 k 个分组周期内, M 根发射天线上发射的信号 $X(k)$ 可表示为 $T \times M$ 的矩阵, N 根接收天线上的接收信号 $Y(k)$ 可表示为 $T \times N$ 的矩阵, 噪声项 $W(k)$ 表示为 $T \times N$ 的矩阵, 它们之间满足:

$$Y(k) = \sqrt{\rho/M} X(k) H(k) + W(k) \quad (1)$$

2.2 酉空时调制 (USTM)

USTM 是 MIMO 系统中的一种多进制调制, 是将信息序列映射为 UST 信号的过程。UST 信号可表示为由 $T \times M (T > M)$ 的矩阵 Φ_l , 其列矢量相互正交, 即

$$\Phi_l^H \Phi_l = I_M, \quad l = 1, \dots, L \quad (2)$$

这里上标 H 表示矩阵的共轭转置变换, I_M 表示 M 阶的单位矩阵。

在第 k 个分组周期内, 发射端将 q 位信息序列映射成某个 UST 信号 $\Phi(k)$, $\Phi(k)$ 属于集合 $\Omega = \{\Phi_1, \dots, \Phi_L\}$, 再对信号乘以 \sqrt{T} , 形成发射信号 $X(k) (T \times M)$:

$$X(k) = \sqrt{T} \Phi(k) \quad (3)$$

定义频带利用率 R 为平均每符号周期内发射的信息比特, 单位为比特每秒赫, 也可称作编码比率。在 USTM 中, 信号的频带利用率为 $R = q/T$, 如果 UST 信号星座图的大小为 L , 那么星座图的大小 L 必须不小于 2^{RT} 。

USTM 被证明是高信噪比下一种达到信道容量的最佳调制方式^[2,5]。

基于非相干解调, 文献 [2, 3] 中给出了最大似然 (ML) 译码:

$$\hat{\Phi}(k) = \arg \max_{\Phi_i \in \Omega} \text{tr}\{\mathbf{Y}^H(k)\Phi_i\Phi_i^H\mathbf{Y}(k)\} = \arg \max_{\Phi_i \in \Omega} \|\Phi_i^H\mathbf{Y}(k)\| \quad (4)$$

这里 $\|\cdot\|$ 表示求 Frobenius 范数, tr 表示求矩阵的迹 (trace)。

在此解调方式下, 为达到低错误概率, UST 信号星座图的设计准则为使 $\|\Phi_i^H\Phi_{i'}\| (i \neq i')$ 尽可能小 [6]。

一种常用的 UST 信号结构为 [6]:

$$\Phi_{l_1 l_2 \dots l_K} = \Theta_1^{l_1-1} \Theta_2^{l_2-1} \dots \Theta_K^{l_K-1} \Phi_l, \quad l_i = 1, \dots, L_i, \quad i = 1 \dots K \quad (5)$$

$$\Theta_i = \text{diag}[\exp(j2\pi u_1/L_i), \dots, \exp(j2\pi u_t/L_i)],$$

$$0 \leq u_1, \dots, u_t \leq L_i - 1, \quad i = 1, \dots, K \quad (6)$$

其中 diag 表示对角矩阵。 Φ_1 为 DFT 矩阵的 M 列组成。 Φ_1 和 “频率” 系数 u_1, \dots, u_t 根据最小错误概率准则搜索获得。

2.3 差分空时调制 (DSTM)

另一种可无信道估计的调制方式应用于 MIMO 系统的 DSTM [3,4,7]。

DSTM 将 q 位信息序列映射成某酉阵 $\mathbf{V}(k) (M \times M)$, $\mathbf{V}(k)$ 属于群 $\Xi = \{V_1 \dots V_L\}$ 。然后采用差分调制, 发射信号 $\mathbf{X}_{\text{DST}}(k) (M \times M)$ [6]:

$$\mathbf{X}_{\text{DST}}(k) = \mathbf{V}(k)\mathbf{X}_{\text{DST}}(k-1), \quad k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

DSTM 方式的频带利用率 $R = q/M$ 。群的大小 $|\Xi| = L > 2^{RT}$ 。

它设计的思想是每个酉阵 V_l 与 I_M 能够构成一个 UST 信号 $\Phi_l (2M \times M)$:

$$\Phi_l = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_M \\ V_l \end{bmatrix}, \quad l = 0, \dots, L-1 \quad (8)$$

这种等效性可以推导出相应的解调方法和群 Ξ 的设计准则。

3 新的酉空时调制 (DPUSTM)

3.1 高频带利用率的信号设计

从 2.2 节分析可看到, 星座图的扩大需要重新搜索新的 “频率” 系数 $u_1 \dots u_t$, 复杂度比较高。本文以一个新的角度来探讨这个问题, 希望以 USTM 为基础, 增加一种新的调制方式, 且合二为一的新调制方式不影响 UST 信号的解调, 又能对新增调制信号正确解调。假设新增的调制信号为方阵 S , 则新发射信号可能有两种表达式: $\mathbf{X}(k) = \sqrt{T}S(k)\Phi(k)$ 或 $\mathbf{X}(k) = \sqrt{T}\Phi(k)S(k)$ 。

新信号不影响 UST 信号的解调, 即要求接收信号的转移概率与 S 无关, 也可由式 (4), 通过要求 S 信号在 UST 解调中的不可分辨性判断 S 信号的必要条件, 两者等价。下面从转移概率的角度给出新调制方式要满足的必要条件:

(1) 假设 $p[\mathbf{Y}/(S\Phi)]$ 仅与 Φ, \mathbf{Y} 有关, 收发信号之间的转移概率为

$$p(\mathbf{Y}/\mathbf{X}) = \exp(-\text{tr}\{\Lambda^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H\})/(\pi^{TN}|\Lambda|^N) \quad (9)$$

这里 $|\cdot|$ 表示求矩阵的行列式。其中 $\Lambda (T \times T)$ 表示发射信号的协方差矩阵:

$$\Lambda = I_T + (\rho T/M)\mathbf{X}\mathbf{X}^H \quad (10)$$

若条件 (1) 满足, 则 Λ 与 $|\Lambda|$ 都仅为 Φ 的函数, 由 Λ :

$$\Lambda = I_T + (\rho T/M) S \Phi (S \Phi)^H = I_T + (\rho T/M) S \Phi \Phi^H S^H \quad (11)$$

由于式 (11) 与 S 无关, 则 S 为恒定的矩阵.

又根据 $|I + AB| = |I + BA|^{[2]}$, 可计算 $|\Lambda|$:

$$|I_T + (\rho T/M) S \Phi (S \Phi)^H| = |I_T + (\rho T/M) S \Phi \Phi^H S^H| = |I_T + (\rho T/M) \Phi \Phi^H S^H S| \quad (12)$$

由于式 (12) 与 S 无关, 则 $S^H S = I_T$, 即 S 为酉阵.

由以上两种推论, 可知 S 为恒定的酉阵, 与 S 为可变的调制信号矛盾, 该假设不成立.

(2) 假设 $p[Y/(\Phi S)]$ 仅与 Φ, Y 有关, 分析思路与 (1) 的类似: 若 Λ 仅与 Φ 有关, 计算 Λ 得:

$$\Lambda = I_T + (\rho T/M) \Phi S (\Phi S)^H = I_T + (\rho T/M) \Phi S S^H \Phi^H = f_1(\Phi) \quad (13)$$

可推得 $S S^H$ 为常数矩阵.

若 $|\Lambda|$ 仅与 Φ 有关, 推导可得其必要条件为 $S S^H = I_M$, 即 S 为酉阵时, 该假设成立.

于是, 可得出结论: 可能的新调制方式为 $X = \sqrt{T} \Phi S$, 且 S 必须为酉阵.

新的调制方式不仅要实现更多进制的调制, 还要实现无信道估计条件下的 Φ 和 S 的解调. 符合条件的 S 有很多, 这里仅考虑一种比较简单的情况, S 为 $\exp(j2\pi\theta) I_T$, 即为标量 $s = \exp(j2\pi\theta)$, 这样信号 s 可采用 DPSK 调制来承载更多的信息. 于是得出一种新的空时调制——差分相位酉空时调制 DPUSTM. 它在保证 UST 信号错误概率性能不变的前提下, 采用了更多进制的调制, 提高了频带利用率.

3.2 新调制方式 (DPUSTM)

3.2.1 调制 DPUSTM 由两个并行调制结合而成: USTM 和 DPSK 调制, 具体过程如图 1.

首先将 q 位信息码组调制成一个 UST 信号 $\Phi(k) (\Phi(k) \in \Omega)$, 再将 p 位信息码组进行 2^p 相位的 DPSK 调制, DPSK 信号集合的大小为 $L_s = 2^p$

$$\left. \begin{aligned} s(k) &= \exp(j2\pi\theta(k))s(k-1), \quad \theta \in \{0, 1/(L_s), \dots, (L_s-1)/(L_s)\} \\ s(0) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

然后 $s(k-1)$ 与 $\Phi(k)$ 相乘, 则新调制信号为

$$x(k) = \sqrt{T} s(k-1) \Phi(k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (15)$$

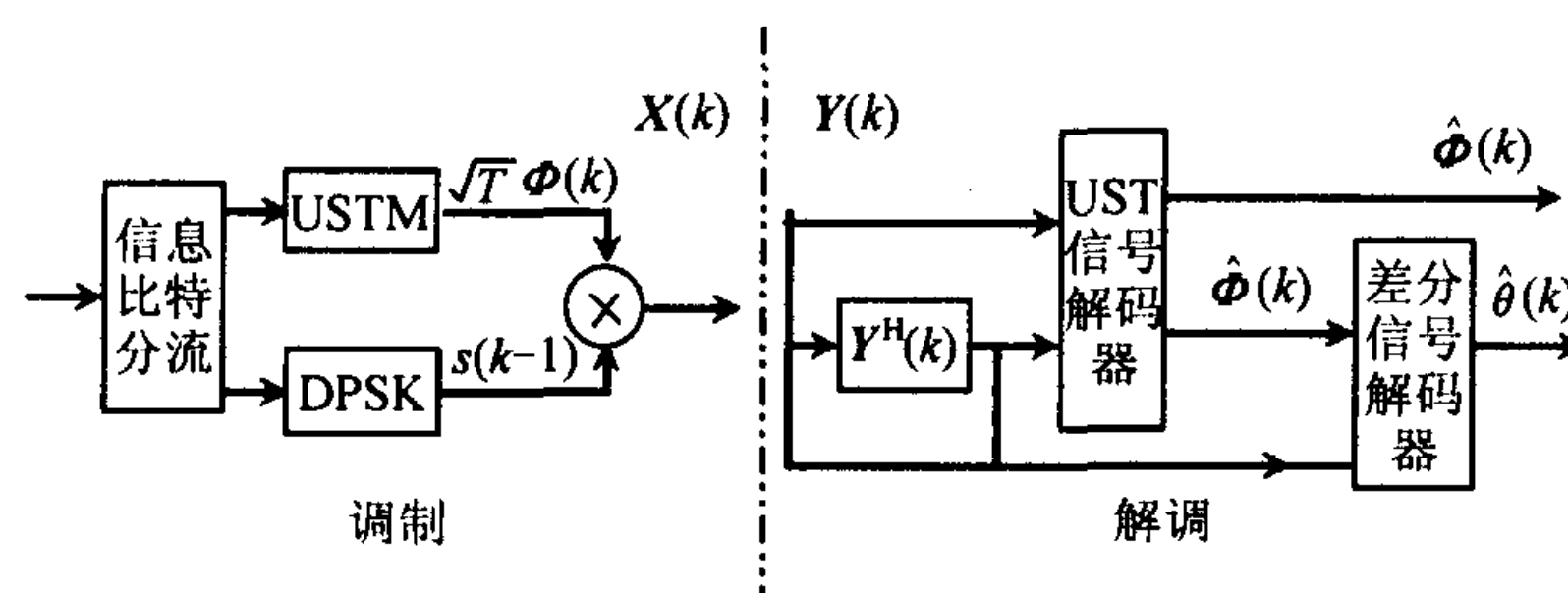


图 1 DPUSTM 系统的调制和解调

根据 $\|\cdot\|$ 的酉不变的特性^[9], $s\Phi$ 也是酉阵, 即 $(s\Phi)^H(s\Phi) = M\|s\Phi\| = I_M$. 可见 DPUSTM 也是高信噪比下一种达到信道容量的最佳调制方式. DPUSTM 的频带利用率 $R = (q+p)/T$, 比 USTM 的频带利用率提高了 p/T 倍.

另外, 这种差分调制不同于 2.3 节介绍的 DSTM, DSTM 将所有信息映射到酉阵上, 而 DPUSTM 将信息分别调制到 UST 信号上和 DPSK 信号上, 只对部分信息采用了差分相位调制; 其次 DPUSTM 可以在任何 UST 信号星座图上扩展, 比 DSTM 应用更灵活.

3.2.2 解调 根据式 (1), 接收信号可改写为

$$Y(k) = (\sqrt{\rho T/M})s(k-1)\Phi(k)H(k) + W(k) \quad (16)$$

信号的解调可以分为两部分: UST 信号的解调和 DPSK 调制信号的解调.

s 的存在没有影响 UST 信号的正确解调, UST 信号仍然可采取式 (4) 的非相干解调 $\hat{\Phi}(k) = \arg \max_{\Phi_i \in \Omega} \text{tr}\{Y^H(k)\Phi_i\Phi_i^H Y(k)\}$, 得到 $\hat{\Phi}(k)$.

再采用差分解调. 由式 (16), 可得

$$\hat{s}(k-1)\hat{H}(k) = \sqrt{M/\rho T}\hat{\Phi}^+(k)Y(k) \quad (17)$$

假设 $\hat{H}(k) \approx \hat{H}(k+1)$, 根据 ML 译码

$$\hat{\theta}(k) = \arg \max_{\theta=0, \dots, (Ls-1)/Ls} \text{tr}\{(Y^H(k)\hat{\Phi}(k)\hat{\Phi}^H(k+1)Y'(k+1))e^{j2\pi\theta}\} \quad (18)$$

至此可以分别解调出 $\hat{\Phi}(k)$, $\hat{\theta}(k)$, 如图 1. 最后由 $\hat{\Phi}(k)$, $\hat{\theta}(k)$ 分别解出信息比特.

由调制解调可以看出, $s(k-1)$ 使 $\Phi(k)$ 的每个列矢量产生同样的相移, $\Phi(k)$ 信号解调时, 由于式 $\text{tr}\{Y^H(k)\Phi_i\Phi_i^H Y(k)\}$ 中 $Y^H(k)Y(k)$ 将 $\Phi(k)$ 中因 $s(k-1)$ 带来的相移抵消, 所以 $\Phi(k)$ 解调可以不受 $s(k-1)$ 影响, 接着通过差分解调, 可得到具体的相移信息 $s(k-1)$, 这额外获得的相移信息就是 DPUSTM 频带利用率提高的原因.

综上所述, 本文从新的角度提出一种多种调制融合的设计思想来提高系统的频带利用率, 从理论上推导出这种新调制方式需要满足的必要条件. 然后根据理论结果, 给出一种设计实例——DPUSTM. DPUSTM 将 USTM 与 DPSK 调制有机融合, 不仅是一种达到信道容量的最佳调制方式, 而且比 USTM 提高了频带利用率. DPUSTM 系统采用非相干解调, 能分别解调出 UST 信号和 DPSK 信号, 可适用于多速率并行的无线数据通信.

4 仿真结果

为验证理论分析的有效性和检验提出的 DPUSTM 的性能, 利用 MATLAB 软件进行了仿真. 仿真中所采用的发射天线数 $M = 2$, 接收天线数 $N = 1$. 仿真中, 不同收发天线之间的子信道相互独立. 每个子信道为准静态慢衰落信道. 即: 信道增益模型化为双边方差为 $1/2$ 的独立复高斯随机变量取样, 且相邻的信道增益有 90% 的相关度以保证信道衰落过程是连续的. 另外, 所有发射天线的总功率为 1, 且各发射天线平均功率相等, 仿真中的 SNR 的测量为在单根接收天线输出端测得值. SNR 测试的范围与文献 [2-4] 中基本一致, 为 $[0, 20]$ dB. UST 信号星座图选自文献 [6], DSTM 采用的 UST 信号星座图选自文献 [4]. 仿真中采用的信号星座图如表 1.

表 1 信号星座图

调制方式	UST 信号					DPSK		
	R	T	q	L	“频率”系数 $[u_1 \cdots u_t]$	Φ_1	q_s	L_s
USTM1	3/8	8	3	8	$[1\ 3\ 0\ 7\ 2\ 5\ 6\ 7], K=1$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & e^{j(2\pi/8)} & \cdots & e^{j(2\pi/8)\cdot 7} \end{bmatrix}$		
USTM2	9/8	8	9	512	$[1\ 0\ 15\ 3\ 10\ 9\ 15\ 17], K=2$ $[0\ 1\ 22\ 16\ 14\ 4\ 21\ 21]$	同上		
USTM3	1/2	8	4	16	$[1\ 12\ 11\ 9\ 14\ 6\ 10\ 0], K=1$	同上		
DPUSTM1	1/2	8	3	8	$[1\ 3\ 0\ 7\ 2\ 5\ 6\ 7], K=1$	同上	1	2
DPUSTM2	5/8	8	3	8	$[1\ 3\ 0\ 7\ 2\ 5\ 6\ 7], K=1$	同上	2	4
DPUSTM3	5/4	8	9	512	$[1\ 0\ 15\ 3\ 10\ 9\ 15\ 17], K=2$ $[0\ 1\ 22\ 16\ 14\ 4\ 21\ 21]$	同上	1	2
DSTM	1/2	2	1	2	$[0\ 1]$ (这里表示的是对角酉阵信号的“频率”系数)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}^T$ (T 表示求矩阵转置)		

(R 表示频带利用率 (比特每秒赫), q_s, L_s 分别为 DPSK 信号的调制进制和星座图的大小, T, q, L 分别为 UST 信号的发射周期, 调制进制和星座图的大小, UST 信号结构如式 (5))

首先为了验证 3.1 节理论推导的有效性, 分别统计 DPUSTM 系统中 UST 信号和 DPSK 调制信号的误比特率 BER, 并与 USTM 与单天线的 DPSK 调制比较, 如图 2(a), 图 2(b)。从图 2 可以看到, 当 USTM 系统与 DPUSTM 系统采用相同的 UST 信号星座图时, 尽管 DPUSTM 多承载了 DQPSK 信号, 但 DPUSTM 中的 UST 信号与 USTM 系统的误比特率基本相同, 证明了 DSPTM 没有影响 UST 信号的解调。DPSK 的误比特率要略高于 UST 信号部分的误比特率, 是因为 DPSK 信号解调结果依赖 $\hat{\Phi}(k)$, 错误概率一般劣于 USTM 的错误概率。DPUSTM 系统总的误比特率与 USTM 系统相比, 以极小的性能损失为代价, 获得明显的频带利用率增益。当采取更多进制的 DPSK 调制时, 频带利用率的增益也会更明显。DPUSTM 与传统的 DQPSK 相比, 当 BER 为 10^{-2} 时, DPUSTM 比 DQPSK 调制有约 12dB 的性能改善, 这主要是由于 DPUSTM 系统不仅有天线分集增益, 而且还有编码增益, 比单天线系统的基于非相干解调的系统有明显的性能改善。

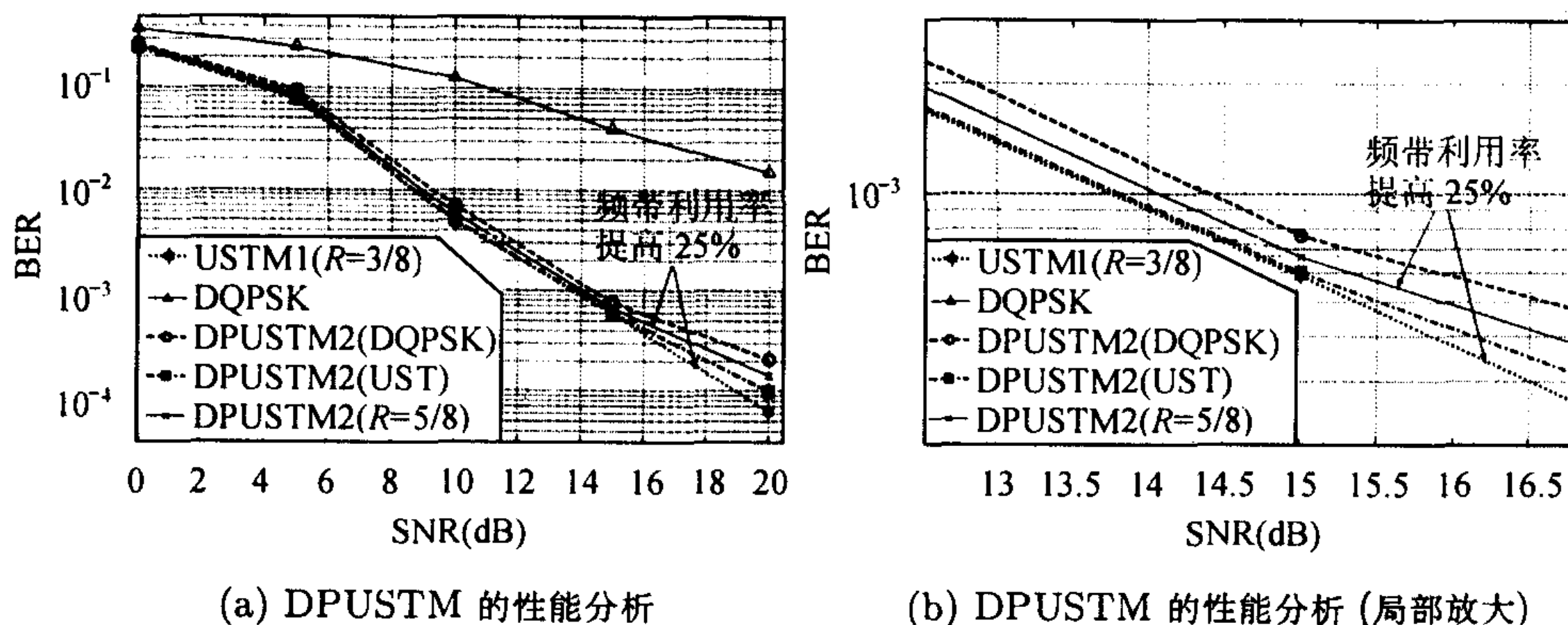


图 2

为了检验 DPUSTM 的误比特率性能, 分别以相同的频带利用率和相同的 UST 信号星座图为标准, 比较 DPUSTM 与 USTM 和 DSTM 在不同 SNR 下的误比特率。如图 3, 在相同的频带利用率 $R = 0.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 下, DPUSTM 比 USTM 和 DSTM 都有更低的误比特率, 从仿真结果可看到在 BER 为 10^{-4} 时, DPUSTM 比 USTM 有 1.6 dB 的性能改善, 比 DSTM 有大致 2.5 dB 的性能改善。而且随着 SNR 的增大, DPUSTM 的性能优越性越显著。从图 4

可以看到基于相同的 UST 信号星座图时, 当 DPUSTM 比 USTM 多承载了 DBPSK 的信息, 频带利用率 R 提高了 12.5%; 当 DPUSTM 比 USTM 多承载了 DQPSK 的信息, R 提高了 25%; 它们的误比特率性能一般要略差于 USTM, 但在 R 为 9/8 bit/(s·Hz) 的 USTM, BER 为 10^{-3} 时, DPUSTM 反而有 1.1 dB 的性能改善, 这是由于此时 DPUSTM 中的差分信号的 BER 略低, 因为当前的 UST 信号星座图中不同信号之间的相关性比较大, 易误判成一个与真实值近似的信号, 而 DPSK 只是利用了其软信息 $\hat{\Phi}^H(k)\hat{\Phi}(k+1)$ 来判决, 不一定错误解调, 所以达到了比 USTM 更好的误比特率性能, 这点是优于普通的差分调制的。

综上所述, 新的调制方式的性能符合 3.1 节的理论设计, 而且 DPUSTM 比 USTM, DSTM 有明显的优越性, 基于同样的 UST 信号星座图, 它比 USTM 不仅提高 12.5% 的频带利用率, 而且可得到了约 1.1 dB 的性能改善, 如果基于相同的频带利用率, DPUSTM 比 USTM, DSTM 分别能有约 1.6 dB, 2.5 dB 的性能改善, 且随着 SNR 的增大, 改善更多。

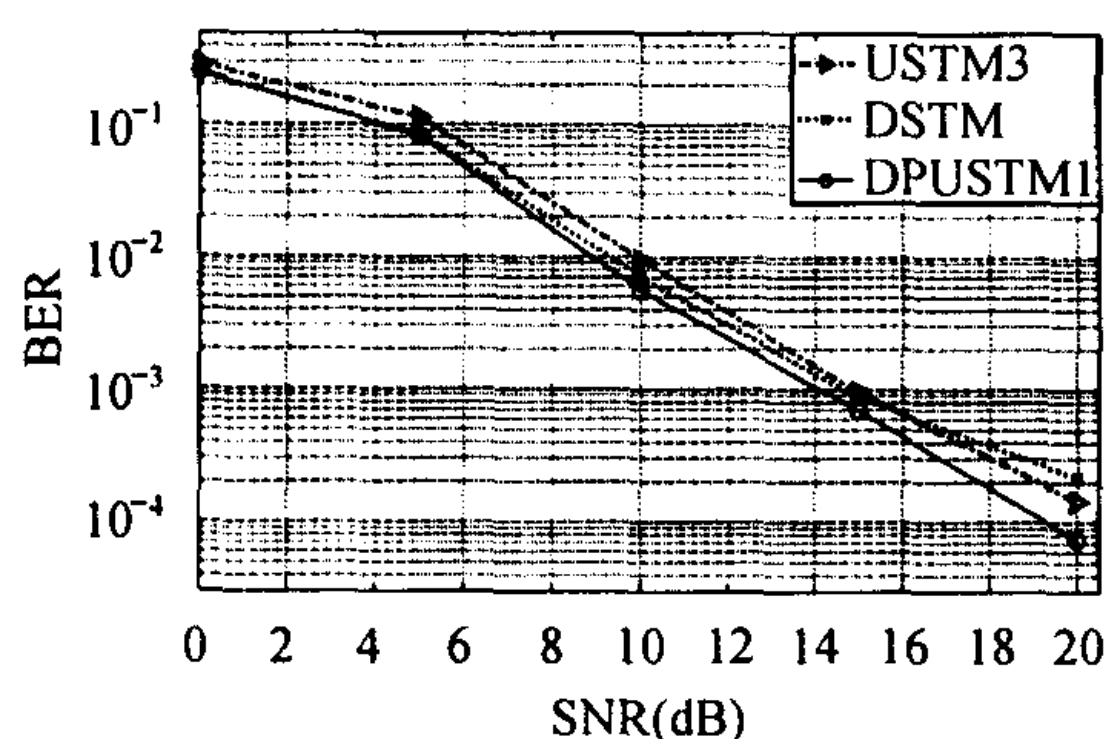


图 3 基于相同 R 的不同调制方式的性能比较

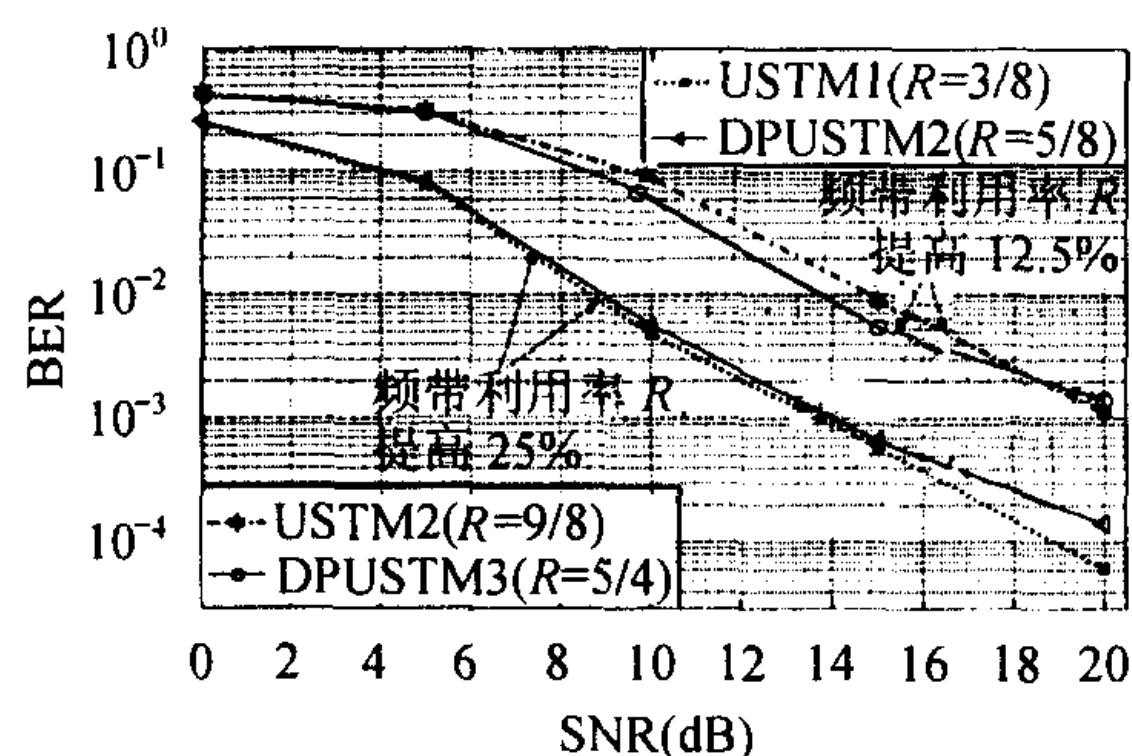


图 4 基于相同 UST 信号星座图的不同调制方式性能比较

5 结论

为了提高频带利用率, 前人的工作主要集中在 UST 信号星座图的设计上, 本文从一个新的角度分析该问题, 力求通过多种调制的有机融合来提高系统的频带利用率, 并从理论上推导出此类调制方式需要满足的必要条件, 并根据理论结果提出一种新的差分调制方式——DPUSTM, 并设计了其相应的解调方式, 它可在任意 UST 信号星座图上扩展, 有效地将 USTM 与 DPSK 调制结合, 与 USTM 相比, 以较低的复杂度可提高频带利用率, 且没有影响 UST 信号的差错概率; 与 DSTM 相比, 应用更灵活, 另外, DPUSTM 可分别解调两种不同 UST 信号和 DPSK 信号, 可以考虑运用到多速率并行传输的无线通信中, 仿真结果不仅证明了新方法的有效性, 而且体现了新调制方式的性能优越性, 为了进一步验证 DPUSTM 的有效性, 以后的工作还将考虑建立实验系统验证。

参 考 文 献

- [1] Larsson E G. Unitary nonuniform space-time constellations for the broadcast channel. *IEEE Commun. Letters*, 2003, 7(1): 21-23.
- [2] Hochwald B M, Marzetta T L. Unitary space-time modulation for multiple-antenna communication in Rayleigh flat fading. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000, 46(2): 543-564.
- [3] Hochwald B M, Sweldens W. Differential unitary space-time modulation. *IEEE Trans. on Commun.* 2000, 48(12): 2041-2052.
- [4] Hughes B L. Differential space-time modulation. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000, 46(7): 2567-2578.

- [5] Marzetta T L, Hochwald B M. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat-fading. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1999, 45(1): 139-157.
- [6] Hochwald B M, Marzetta T L, Richardson T J, Rudiger W S. Systematic design of unitary space-time constellations. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000, 46(6): 1962-1973.
- [7] Liang Xue-bin, Xia Xiang-gen. Unitary signal constellations for differential space-time modulation with two transmit antennas: Parametric codes, optimal designs and bounds. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2002, 48(8): 2291-2232.
- [8] Shokrollahi A, Hassibi B, Hochwald B M, Sweldens W. Representation theory for high-rate multiple-antenna code design. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2001, 47(6): 2335-2367.
- [9] 程云鹏. 矩阵论. 第二版, 西安: 西北工业大学出版社, 2001: 126 页.

- 邹 黎: 女, 1976 年生, 博士生, 主要研究方向为多载波系统、多天线技术、无线通信中的信号处理.
- 赵玉萍: 女, 1961 年生, 副教授, 主要研究方向为无线资源管理、GSM/GPRS 无线通信系统、无线数据传输协议及实现、移动无线信道估计、调制、编码、传输、多载波通信系统、宽带无线网络.
- 王 兵: 女, 1966 年生, 博士生, 主要研究方向为多载波系统、多天线技术、无线通信中的信号处理.
- 项海格: 男, 1941 年生, 教授, 主要研究方向为数字通信和信号处理, 包括直接序列扩展频谱通信、多载波频率分集扩展频谱通信、软件无线电技术、自适应干扰抑制技术和多用户检测技术、空分多址和 MIMO 系统的研究.
- 梁庆林: 男, 1941 年生, 教授, 主要研究方向为卫星与无线通信系统、无线通信系统和数字通信技术等, 包括直接序列扩展频谱通信、多载波频率分集扩展频谱通信、自适应干扰抑制技术、空分多址和 MIMO 系统的研究.