

DOI: 10.7652/xjtuxb201308017

获得天线选择分集的空移键控调制算法

李晓峰, 王磊, 张晓阳

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了解决空移键控(SSK)调制不能获得发射分集的缺陷,提出了一种基于天线子集选择的SSK算法(ASD-SSK)。ASD-SSK算法利用各个发射天线的具有不同特性的无线传输信道构造了一个信号星座图;然后依据最优星座图子集准则(即星座点间的最小距离最大)选择最优的发射天线子集;最后利用所选的天线子集,采用SSK调制方式来传输信息。在每次天线子集选择中将距离最小的一对信道分开,从而将总的天线集合分成2个子集,依次迭代,可以有效降低ASD-SSK天线子集选择的复杂度。仿真结果表明:相比SSK算法,ASD-SSK算法不仅获得了选择分集增益,而且总的发射天线数目越多,分集增益越大;在 $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 、发射天线数为6、误码率为 10^{-3} 的条件下,ASD-SSK算法有14 dB左右的增益。

关键词: 空移键控调制;发射分集;信号星座图;天线选择

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0098-06

A Space Shift Keying Modulation for Antenna Selection Diversity

LI Xiaofeng, WANG Lei, ZHANG Xiaoyang

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new space shift keying (SSK) modulation based on antenna selection diversity, called ASD-SSK is presented to solve the problem that existing SSK modulations cannot achieve transmit diversity. ASD-SSK utilizes the wireless channels of different transmit antennas with different characters to construct a signal constellation. Then, the optimal antenna subset is determined by selecting the optimal constellation subset which maximizes the minimum distance between the points in the subset. The information is then transmitted by using the SSK modulation with the selected antenna subset. In the iteration process of selecting the optimal antenna subsets, the total antenna set is divided into two smaller subsets by separating the two channels that have the smallest distance. This iteration scheme can effectively reduce the complexity of antenna subset selecting in the ASD-SSK. Simulation results show that the ASD-SSK scheme outperforms the original SSK in achieving selection diversity, and that the more the transmit antennas there are, the bigger the transmit diversity is. The ASD-SSK achieves about 14 dB gains when there are 6 transmit antennas at $2 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ and symbol error rate is 10^{-3} .

Keywords: space shift keying modulation; transmit diversity; signal constellation; antenna selection

在无线通信技术中,由于空间调制(SM)和空移 键控(SSK)^[1-3]每次只激活一根发射天线,所以很好

地解决了 MIMO 技术^[4-6]的以下 3 个普遍缺陷^[2]。

(1)由码元在时间和空间上重叠所引起的信道之间的干扰(ICI)问题。

(2)多个天线之间的同步(IAS)问题。在 MI-MO 通信系统中,多根发射天线往往要同时发射信号,例如 V-BLAST 传输方案或者 Alamouti 码,所以,发射天线之间同步的精确程度直接影响到系统性能的好坏。

(3)射频链路(RF)较多。各发射天线要同时发射信号,因而要为每根发射天线匹配一条射频链路,而射频链路往往比较昂贵。

另外,由于 SSK 复杂度比较低,近来受到研究人员的广泛重视^[7-14]。

然而,SSK 调制也有它固有的缺陷,因为 SSK 调制每次只利用一根天线发射脉冲信号,而且信号没有使用 APM 调制,所以传输速率比较低。另外,因为 SSK 只能获得接收分集而无法获得发射分集,所以当信道深衰落时,SSK 具有较高的误码率。对此,文献[7]和文献[14]分别利用脉冲成型(使每根发射天线发射的不同的脉冲信号具有很好的自相关和互相关性)和时间分集的方法使 SSK 获得发射分集增益,但是文献[7]中的脉冲波形的设计比较复杂,而文献[14]虽然获得了发射分集增益,但由于采用时间分集使得 SSK 的传输速率更低了。

针对 SSK 的上述缺陷,本文提出了基于发射天线子集选择的 SSK 算法(ASD-SSK),不仅可以获得分集增益,而且比文献[7,14]的算法更为简单实用。SSK 调制的实质是利用信道的不同来传递信息,因此不同信道就构成了一个信号星座图,选择发射天线子集就相当于选择信号星座图子集。通过选择最佳的星座图子集(使星座点间的最小距离最大),ASD-SSK 调制可以获得选择分集增益。性能分析和实验结果表明,相比 SSK 调制,本文提出的 ASD-SSK 算法具有较大的选择分集增益。此外,当总的发射天线数目比较大时,天线子集的组合数目也很大,所以最优子集的选择会比较复杂。本文在每次选择中将距离最小的一对信道分开,从而将总的天线集合分成两个子集,依次迭代,可以有效降低天线子集选择的复杂度。

1 SSK 系统模型^[2]

考虑 1 个采用 SSK 调制的 MIMO 系统,系统具有 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线。收发两端的 $N_r \times N_t$ 维信道矩阵用 $\mathbf{H}$ 表示,其中第 (i, j) 个元

素 h_{ij} 表示从第 j 根发射天线到第 i 根接收天线之间的信道系数,是均值为 0 方差为 1 的复高斯随机变量。在发射端,将待发送的码字集合记为 $\{\mathbf{b}_k\}$,其中 $\mathbf{b}_k=[b_1, b_2, \dots, b_M], k=1, \dots, 2^M; b_j=0$ 或 $1, j=1, \dots, M$ 。记码字集合中元素个数为 $K=2^M$ 。假设有 $N_t=K$ 根发射天线,这样不同的码字与发射天线之间就可以满足一一映射关系。先确定好这种映射关系,假设要传输某个码字 b_k ,就选择码字 b_k 对应的发射天线 k ,则在第 k 根天线上发射一个脉冲,而其它的天线不发射任何信号,保持沉默。这样,采用 SSK 调制时的 $N_t \times 1$ 维发射信号为

$$\mathbf{x}_k = [0, \dots, E^{1/2}, \dots, 0]^T \tag{1}$$

式中: E 为发射一个码字的能量,是矢量 $\mathbf{x}$ 的第 k 个元素。表 1 给出了一个描述码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 到发射信号集合 $\{\mathbf{x}_k\}_{k=1}^K$ 映射的具体例子,为方便起见取 $E=1$ 。

表 1 SSK 调制映射表格

$[b_1, b_2]$	码字号	天线索引号	$[x_1, x_2, x_3, x_4]^T$
$[0, 0]$	1	1	$[1, 0, 0, 0]^T$
$[0, 1]$	2	2	$[0, 1, 0, 0]^T$
$[1, 0]$	3	3	$[0, 0, 1, 0]^T$
$[1, 1]$	4	4	$[0, 0, 0, 1]^T$

$\mathbf{H}$ 的第 k 列为 $\mathbf{h}_k$,则采用 SSK 调制的 MIMO 系统模型可以简化为

$$\mathbf{y} = E^{1/2} \mathbf{h}_k + \mathbf{w} \tag{2}$$

式中: $\mathbf{y}$ 是 $N_r \times 1$ 维的接收信号; $\mathbf{w}$ 是加性高斯白噪声(AWGN),服从 $CN(0, 1)$ 分布。由式(2)可见,不同的发射天线 k 对应不同的信道矢量 $\mathbf{h}_k$,而接收信号 $\mathbf{y}=E^{1/2} \mathbf{h}_k + \mathbf{w}$ 是关于信道矢量 $\mathbf{h}_k$ 的函数。因此,如果接收端已知信道信息,那么就可以在接收端检测出信道 $\mathbf{h}_k$,再根据先前确定好的映射关系,进而译出传输的比特流 $\mathbf{b}_k=[b_1, b_2, \dots, b_M]$ 。由此可知 SSK 要求接收端已知信道信息,但是对发射端不作要求。

2 ASD-SSK 算法

由 SSK 的系统模型可见,SSK 只利用了一根发射天线发送信号,因而很难获得发射分集。针对此问题,本文提出的 ASD-SSK 算法通过在发射端进行发射天线子集的选择来获得较大的选择分集增益,从而提升 SSK 的性能。

2.1 ASD-SSK 调制

由式(2)可以看出,当发射的码字 $\mathbf{b}_k$ 不同时,对应的信道 $\mathbf{h}_k$ 就不同。由文献[2]可知,SSK 中的信道 $\mathbf{h}_k$ 之间构成了一个信号星座图。所以,在信噪比较大的情况下,决定 SSK 调制系统性能的则是信道 $\mathbf{h}_k$ 之间的差异,它们的差异越大,相当于星座图中的点之间的距离越大,系统的性能就越好。基于此原理,可以在发射端放置 N_t 根天线,分别标号为 $1, \dots, N_t$,其对应的信道矢量集合记为 $\{\mathbf{h}_n\}, n=1, \dots, N_t$,并且使天线的数目多于码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 的数目 $K=2^M$ 。每次信道实现,接收端从与 N_t 根发射天线对应的信道矢量集合 $\{\mathbf{h}_n\}, n=1, \dots, N_t$ 中选择 K 个用来传输码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 。不难计算,从 N_t 根发射天线中选择 K 个总共有 $\binom{N_t}{K}$ 种组合,然后再从这 $\binom{N_t}{K}$ 种组合中选择可使系统性能最好的一组天线子集的组合。将任意一组天线子集记为 $\{c_k\}_{k=1}^K, 1 \leq c_k \leq N_t, k=1, \dots, K$ (c_k 为发射天线的索引号),将该子集的元素以任意顺序排列所组成的向量记为 $\mathbf{C}=[c_1, c_2, \dots, c_K]$,该天线子集所对应的信道矢量子集记为 $\{\mathbf{h}_i\}, i \in \{c_k\}_{k=1}^K$ 。关于天线子集 $\{c_k\}_{k=1}^K$ 的选择准则,将在下文中具体介绍。这时,接收端只需要把矢量 $\mathbf{C}$ 反馈给发射端,发射端根据要发射的码字 $\mathbf{b}_k$ 激活相应的发射天线 c_k 发射一个脉冲信号。至此,SSK 调制过程完成。因为要反馈的是矢量 $\mathbf{C}$,而不是信道 $\mathbf{H}$,所以总的反馈量很小。图 1 给出了 ASD-SSK 算法的实现框图。

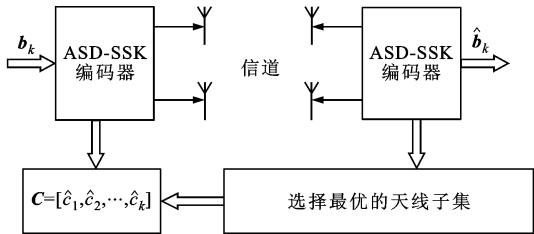


图 1 ASD-SSK 算法的框图

记最优的发射天线子集以及相应的反馈矢量分别为 $\{\hat{c}_k\}_{k=1}^K$ 和 $\mathbf{C}=[\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_K]$ 。在 ASD-SSK 算法中,矢量 $\mathbf{C}$ 表示的是码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 与选定的发射天线子集 $\{\hat{c}_k\}_{k=1}^K$ 之间的映射关系, $\mathbf{C}=[\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_K]$ 中的第 k 个元素 $\hat{c}_k$ 表示与码字 $\mathbf{b}_k$ 对应的发射天线的索引号。对于选定的发射天线子集 $\{\hat{c}_k\}_{k=1}^K$,其中的 K 个元素总共有 $K!$ 种排列。那么究竟该选择哪

种映射关系(即矢量 $\mathbf{C}$)呢? 如果码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 是等概率分布的,那么映射关系可以是 $K!$ 中的任意一种。本文假设码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 是等概率分布的。表 2 是 ASD-SSK 算法的一个具体实例。

表 2 ASD-SSK 映射表格

$[b_1, b_2]$	码字号	天线索引号	$[x_1, x_2, \dots, x_6]^T$
[0, 0]	1	1	$[1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$
[0, 1]	2	3	$[0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$
[1, 0]	3	5	$[0, 0, 0, 0, 1, 0]^T$
[1, 1]	4	6	$[0, 0, 0, 0, 0, 1]^T$

2.2 算法的检测

通过反馈矢量 $\mathbf{C}=[c_1, \dots, c_K]$,收发两端都已知选择的发射天线子集 $\{c_k\}_{k=1}^K$ 以及码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 与发射天线之间的对应关系。因此,ASD-SSK 算法的检测与 SSK 算法的检测完全相同:假设接收端已知各信道的状态信息,则接收端通过接收信号 $\mathbf{y}=\mathbf{E}^{1/2}\mathbf{h}_k+\mathbf{w}$ 检测出信道 $\mathbf{h}_i, i, \hat{i} \in \{c_k\}_{k=1}^K$,然后就可以译出相应的比特流 $\mathbf{b}_k$ 了。因为码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 是等概率分布的,所以 ASD-SSK 的最大似然准则^[2]可表述为

$$p_y(\mathbf{y}|\mathbf{x}_i, \mathbf{H}) = \frac{\exp(-\|\mathbf{y}-\mathbf{E}^{1/2}\mathbf{h}_i\|_F^2)}{\pi^{N_t}} \quad i \in \{c_k\}_{k=1}^K \tag{3}$$

$$\hat{i} = \arg \max_i p_y(\mathbf{y}|\mathbf{x}_i, \mathbf{H}) = \arg \min_i \|\mathbf{y}-\mathbf{E}^{1/2}\mathbf{h}_i\|_F^2 \quad i \in \{c_k\}_{k=1}^K \tag{4}$$

式中: $\|\cdot\|_F$ 表示 F 范数; $\hat{i}$ 代表估计的发射脉冲的天线的索引号, $\hat{i} \in \{c_k\}_{k=1}^K$ 。式(3)表示在信道为 $\mathbf{H}$ 、发射码字为 $\mathbf{x}_i$ 的条件下接收矢量 $\mathbf{y}$ 的条件分布;式(4)表示在最大似然准则下,根据接收矢量 $\mathbf{y}$ 检测得到的码字为 $\mathbf{x}_i$ 。

3 性能分析

本节对 ASD-SSK 算法的误码性能进行分析,在此基础上以系统误码率最小为目标给出 ASD-SSK 算法的天线子集选择准则。

3.1 SSK 误码率及天线子集选择准则

假设某次信道实现下所选的发射天线子集对应的信道矢量子集为 $\{\mathbf{h}_i\}, i \in \{c_k\}_{k=1}^K$ 。为了方便描述,将码字 $\mathbf{b}_k$ 对应的信道记为 $\mathbf{h}_{c_k}, k=1, \dots, K$,其中 K 为码字集合的数量。记码字 $\mathbf{b}_k$ 的判决域为 R_k ,假设各个码字是等概率分布的,则条件误码率 $P_{e|u}$

可以表示为

$$P_{e|H} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_r(\mathbf{y} \notin R_k, \mathbf{b}_k) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K P_r(\mathbf{y} \notin R_k, E^{1/2} \mathbf{h}_{c_k}) \quad (5)$$

式中: $P_r(\mathbf{y} \notin R_k, \mathbf{b}_k)$ 表示发射码字为 $\mathbf{b}_k$, 而接收信号 $\mathbf{y}$ 不在判决域 R_k 的概率, 即码字 $\mathbf{b}_k$ 被译错的概率。

由式(3)可知, $p_y(\mathbf{y} | \mathbf{x}_i, \mathbf{H})$ 服从高斯分布。参照文献[2], 可以求的 $P_{e|H}$ 的上界

$$P_{e|H} \leq \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^K P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}) \quad (6)$$

式中: $P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H})$ 为条件成对错误概率, 即在信道增益矩阵 $\mathbf{H}$ 下, 发射码字为 $\mathbf{x}_i$ 、接收端检测为 $\mathbf{x}_j$ 的概率。

$$P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}) = Q\left(\frac{\|\mathbf{H}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|_F}{(2N_0)^{1/2}}\right) \quad (7)$$

式中: N_0 为高斯噪声功率谱密度, 本文中假设 $N_0 = 1$; 函数 $Q(x)$ 的表达式为

$$Q(x) = \int_x^{+\infty} \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (8)$$

将切尔诺夫界 $Q(x) \leq \frac{1}{2} \exp(-x^2)$ 代入(7)式可得

$$P_{e|H} \leq \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^K \exp\left(-\frac{\|\mathbf{H}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)\|_F^2}{2N_0}\right) = \frac{1}{2K} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^K \exp\left(-\frac{\|E^{1/2} \mathbf{h}_i - E^{1/2} \mathbf{h}_j\|_F^2}{2N_0}\right) \quad (9)$$

$$P_e = \epsilon_H(P_{e|H}) \quad (10)$$

式中: $\epsilon_H(\cdot)$ 表示对信道增益矩阵 $\mathbf{H}$ 求均值。鉴于指数函数的性质, 由(9)式可以看到, 在信噪比较大的时候, $P_{e|H}$ 主要取决于所选信道子集 $\{\mathbf{h}_i\}$, $i \in \{c_k\}_{k=1}^K$ 的最小距离, 记为 l , $l = \min_{i \neq j} \|E^{1/2} \mathbf{h}_{c_i} - E^{1/2} \mathbf{h}_{c_j}\|$ 。所以, 天线子集的选择准则为极大化信道子集的最小距离。记最优天线子集为 $\{\hat{c}_k\}_{k=1}^K$, 则有

$$\{\hat{c}_k\}_{k=1}^K = \arg \max_{\{c_k\}_{k=1}^K, 1 \leq c_k \leq N_t, k=1, \dots, K} (l) \quad (11)$$

假定 l 的概率密度函数为 $f(l)$ 。ASD-SSK 正是通过发射端天线的选择来改善 $f(l)$ 的分布, 使其更加集中在 l 值比较大的区域来提高系统的性能。

3.2 天线选择带来的系统性能增益

正如 3.1 节所提到的, ASD-SSK 正是通过发射端天线的选择来改善 $f(l)$ 的分布, 从而提高系统的性能。下面具体分析如何进行天线子集的选择来改善 $f(l)$ 的分布以及由此得到的系统性能增益。

信道子集 $\{\mathbf{h}_i\}$, $i \in \{c_k\}_{k=1}^K$ 的最小距离 l 的分布

$f(l)$ 的闭式解求解比较困难, 我们可以定性地分析 ASD-SSK 的选择分集增益随总的发射天线数目 N_t 的增加是如何变化的。

假设码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 的元素个数为 K , 总的发射天线数目为 $N_t + 1$, $N_t \geq K$ 。前 N_t 根天线的组合数为 $\binom{N_t}{K}$, 包含第 $N_t + 1$ 根天线的组合数为 $\binom{N_t}{K-1}$ 。每次信道实现, 根据极大化信道子集的最小距离 l 准则, 组合 $\binom{N_t}{K}$ 和 $\binom{N_t}{K-1}$ 中分别存在一个最优信道子集, 总的最优子集就是这 2 个最优子集中最小距离较大的一个。也就是说, 如果 $\binom{N_t}{K-1}$ 中的最优子集的最小距离比 $\binom{N_t}{K}$ 中的大, 就选择 $\binom{N_t}{K-1}$ 中的最优子集, 这就是第 $N_t + 1$ 根天线所带来的选择增益的来源, 最优子集属于组合 $\binom{N_t}{K-1}$ 的概率越大, 就表示所增加的这根天线对 l 的改善也越大。

因为各个发射天线对应的信道是独立同分布的, 所以 $\binom{N_t+1}{K}$ 组合中各个天线子集被选为最优子集的概率是相等的。其中, 包含第 $N_t + 1$ 根天线的子集所占的比例为

$$\frac{K}{N_t + 1} = \binom{N_t}{K-1} / \binom{N_t+1}{K} \quad (12)$$

因此, 可以用 $\frac{K}{N_t+1}$ 定性地表示第 $N_t + 1$ 根发射天线带来的选择分集增益。可见, 对于特定的 K 值, 随着 N_t 的增加, $\frac{K}{N_t+1}$ 越来越小, 即增加 1 根天线所带来的系统的选择分集增益越来越小。这些都可以从第 4 节中天线子集的最小距离 l 的蒙特卡罗仿真分布和系统的误比特率曲线图中得到验证。

3.3 降低复杂度的天线子集选择算法

依据极大化信道子集 $\{\mathbf{h}_i\}$, $i \in \{c_k\}_{k=1}^K$ 的最小距离准则, 如果总的发射天线数目 N_t 大于码字集合的维度 K , 那么在一次信道实现下, 总的发射天线对应的信道集合 $\{\mathbf{h}_n\}$ ($n=1, \dots, N_t$) 中距离最小的一对信道(假设为 $\mathbf{h}_{c_{11}}, \mathbf{h}_{c_{12}}$), 必然不会同时出现在最小距离最大的天线子集 $\{\mathbf{h}_i\}$ ($i \in \{c_k\}_{k=1}^K$) 中。由此, 就可以在 天线集合 $\{\mathbf{h}_{c_{11}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}\}\}$ 和

$\{\mathbf{h}_{c_{12}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}\}\}$ 中分别进行信道子集 $\{\mathbf{h}_i\} (i \in \{c_k\}_{k=1}^K)$ 的选择。以此类推,最后在得到的 2^{N_t-K} 个发射天线子集中选择最小距离最大的一个。以下是递推 2 次进行选择的结果

$$\left\{ \begin{aligned} &\{\mathbf{h}_{c_{11}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}\}\} \\ &\left\{ \begin{aligned} &\{\mathbf{h}_{c_{11}}, \mathbf{h}_{c_{21}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}\}\} \cdots \\ &\{\mathbf{h}_{c_{11}}, \mathbf{h}_{c_{22}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}\}\} \cdots \end{aligned} \right. \\ &\{\mathbf{h}_{c_{12}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}\}\} \\ &\left\{ \begin{aligned} &\{\mathbf{h}_{c_{12}}, \mathbf{h}_{c_{23}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}, c_{23}, c_{24}\}\} \cdots \\ &\{\mathbf{h}_{c_{12}}, \mathbf{h}_{c_{24}}, \{\mathbf{h}_n | n \neq c_{11}, c_{12}, c_{23}, c_{24}\}\} \cdots \end{aligned} \right. \end{aligned} \right.$$

(13)

如果采用遍历搜索,即求出所有可能的天线子集组合的最小距离,然后比较选出最小距离最大的一组,将要搜索 $\binom{N_t}{K}$ 个天线子集组合,而依照上述简化算法,则需要搜索 2^{N_t-K} 个组合。由上文分析可知,当 N_t-K 增大时,改进算法的选择分集增益的增加幅度不断下降,因此 N_t-K 很大时意义不大。所以 2^{N_t-K} 不会太大,因而简化的天线子集算法具有较低的复杂度。表 3 对采用遍历搜索和提出的降低复杂度搜索算法的复杂度进行了比较。

表 3 2 种搜索算法的复杂度比较

N_t	K	天线子集数	
		遍历搜索算法	本文算法
5	4	5	2
8	4	70	16
16	8	12 870	256

因为上述简化搜索算法在搜索的过程中比较了所有的天线子集组合,因而得到的是最佳信道子集的准确解,而不是近似解,所以采用改进算法搜索的 ASD-SSK 调制的性能不会因此而变差。

4 仿真与讨论

仿真中均假定各天线之间的信道是相互独立的,并且服从 $CN(0,1)$ 分布。

因为天线子集的最小距离 l 的分布的闭式解比较难求,所以通过蒙特卡罗仿真实验来定性地观察 l 的分布随着发射天线数 N_t 的增加是如何改善的。将 l 的可能取值分为多个小区间,每个小区间用该区间的中值来表示, $g(l)$ 表示实验中 l 落在各个小

区的概率。如此,就可以用 $g(l)$ 近似表示 l 的概率密度函数 $f(l)$ 。实验中码字集合的大小为 $K=4$, $N_r=1$,发射天线数 N_t 分别为 4、6、8、12,对于每个 N_t ,信道实现次数为 10^6 ,实验结果如图 2 所示。从图 2 中可以看到,随着 N_t 的增加, l 的分布越来越集中,均值也越来越大,但是均值增加的幅度却越来越小,这与 3.2 节中的分析结果是一致的。

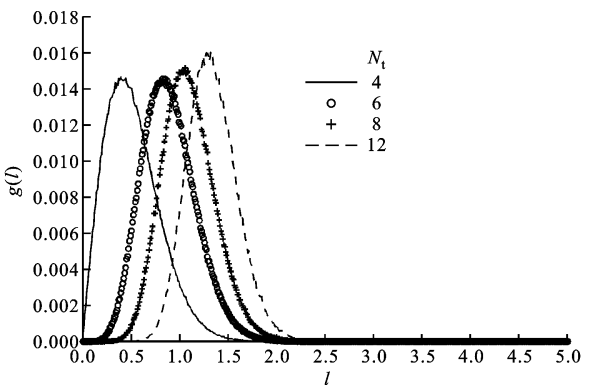


图 2 发射天线数不同时 l 的近似分布

图 3 中给出了在不同的发射天线数 N_t 时,本文提出的 ASD-SSK 算法的误码率-信噪比曲线,其中码字集合 $\{\mathbf{b}_k\}_{k=1}^K$ 的数目 $K=4$, $N_r=1$ 。当 $N_t=4$ 时,相当于没有作天线选择,此时 ASD-SSK 算法就退化为 SSK 算法。从图 3 中看到,由 $N_t=4$ 到 $N_t=5$,SSK 的分集增益增幅最大,以后随着天线数 N_t 的增加,分集增益越来越大,但是分集增益增加的幅度却越来越小,特别是 $N_t=12$ 与 $N_t=14$ 两条曲线,已经相当接近了。所以,再继续增加发射天线数,对系统性能的改善不是很大。上述现象主要是由以下 2 个原因造成的。

- (1)增加发射天线数目 N_t 可以改善天线子集的最小距离 l 的分布,所以分集增益随之逐渐增大。
- (2)由式(9)、(10)可见,在信噪比较大时,条件误

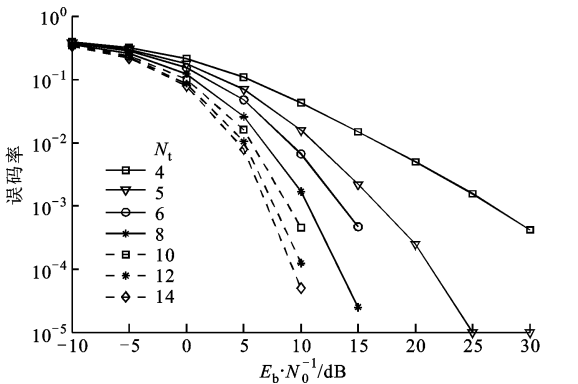


图 3 不同发射天线数 N_t 对应的误码率曲线

码率 $P_{e|H}$ 主要取决于 $\exp(-l^2/2N_0)$ 项。因此 ASD-SSK 的误码率 $P_e = \epsilon_H(P_{e|H})$, 不但受 l 的分布 $f(l)$ 的影响, 而且也受 $\exp(-l^2/2N_0)$ 项的影响, 特别是在 l 比较大时。由指数函数 $\exp(-l^2/2N_0)$ 的特性可知, 在 l 比较大时, $\exp(-l^2/2N_0)$ 比较小, 而且其下降的幅度也越来越小, 所以 P_e 随 l 的改变变化不大。

5 结 论

通过选择最优的发射天线子集, 本文提出了一种新的 SSK 算法——ASD-SSK。该算法通过改善天线子集的最小距离的分布, 从而使 SSK 调制获得选择分集增益。为降低天线选择的复杂度, 本文还提出了一种能够有效简化天线子集选择的方法。理论分析和实验仿真结果表明, 相比于 SSK 调制, ASD-SSK 算法具有明显的发射分集增益, 而且在相同的传输速率下, 发射天线越多, 所获得分集增益就越大, 但是发射增益的增幅却在逐渐减小, 而且随着发射天线数目的增加, 天线子集的选择也越来越复杂。因此, 在实际应用中, 应该根据具体情况选择合适的发射天线数。

参考文献:

- [1] JEGANATHAN J, GHAYEB A, SZCZECINSKI L, et al. Space shift keying modulation for MIMO channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(7):3692-3703.
- [2] MESLEH R Y, HAAS H, SINANOVIC S, et al. Spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4):2228-2241.
- [3] JEGANATHAN J, GHAYEB A, SZCZECINSKI L. Spatial modulation: optimal detection and performance analysis [J]. IEEE Communication Letters, 2008, 12(8):545-547.
- [4] GESBESRT D, SHAFI M, SHIU D S, et al. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wire-less systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3):281-302.
- [5] 殷勤业, 张莹, 丁乐, 等. 协作分集: 一种新的空域分集技术 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6):551-557. YIN Qinye, ZHANG Ying, DING Le, et al. Cooperation diversity: a new spatial diversity technique [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6):551-557.
- [6] 王磊, 陈志刚. 快衰落信道中的分布式差分空时编码

传输方案 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4):77-82.

WANG Lei, CHEN Zhigang. A coding transmission scheme with distributed differential space-time for fast fading channels [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4):77-82.

- [7] RENZO M D, HAAS H. Space shift keying (SSK) MIMO over correlated Rician fading channels: performance analysis and a new method for transmit-diversity [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(1):116-129.
- [8] RENZO M D, HAAS H. A general framework for performance analysis of space shift keying (SSK) modulation for MISO correlated Nakagami- m fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(9):2590-2603.
- [9] RENZO M D, HAAS H. Bit error probability of space-shift keying MIMO over multiple-access independent fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8):3697-3711.
- [10] RENZO M D, LEONARDIS D D, GRAZIOSI F, et al. Space shift keying (SSK) MIMO with practical channel estimates [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(4):998-1012.
- [11] IKKI S S, MESLEH R. A general framework for performance analysis of space shift keying (SSK) modulation in the presence of Gaussian imperfect estimations [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(2):228-230.
- [12] MESLEH R, IKKI S S, ALWAKEEL M. Performance analysis of space shift keying with amplify and forward relaying [J]. IEEE Communications Letters, 2011, 15(12):1350-1352.
- [13] MESLEH R, IKKI S S, ALWAKEEL M. On the performance of dual-hop space shift keying with single amplify-and-forward relay [C]//Proceeding of International Conference on Wireless Communications and Networking: PHY and Fundamentals. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012:776-780.
- [14] YANG Du, XU Chao, YANG Lieliang, et al. Transmit-diversity-assisted space-shift keying for colocated and distributed/cooperative MIMO elements [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6):2864-2869.

(编辑 刘杨)