

# Performance of Deep Space Communication System Based on TAS/STBC Scheme

Lingwei Xu<sup>1</sup>, Hao Zhang<sup>1</sup>, Jingjing Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao

<sup>2</sup>Department of Information Science and Technology, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao

Email: [gaomilaojia2009@163.com](mailto:gaomilaojia2009@163.com)

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2014; revised: Apr. 28<sup>th</sup>, 2014; accepted: May 5<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to improve the system performance, a novel deep space communication system scheme employing transmitting antenna selection (TAS) and orthogonal space-time block code (STBC) concatenated with coding modulation is proposed in this paper. Based on the scalar additive white Gaussian noise (AWGN) channel approach, the exact form expressions of the signal-to-noise ratio (SNR) at the receiving end are derived under the variable-parameter Rician fading channels. Then the system performance under different conditions was evaluated through numerical simulations. Numerical results show that: the proposed scheme could distinctly improve the system performance, with the average symbol error probability decreasing greatly, thus being able to relieve the power limit and bandwidth shortage emerging in the development of deep space communication.

## Keywords

Transmitting Antenna Selection, Orthogonal Space-Time Block Code, Deep Space Communication, Average Symbol Error Probability

---

# 基于TAS/STBC方案的深空通信系统的性能分析

徐凌伟<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 王景景<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学信息科学与工程学院, 青岛

<sup>2</sup>青岛科技大学信息科学与技术学院, 青岛

Email: [gaomilaojia2009@163.com](mailto:gaomilaojia2009@163.com)

收稿日期: 2014年4月22日; 修回日期: 2014年4月28日; 录用日期: 2014年5月5日

## 摘要

为了进一步改善系统性能, 本文提出了一种级联编码调制的使用发射天线选择(TAS)和正交空时分组码(STBC)的深空通信系统的方案。在可变参数Rician衰落信道下, 基于标量的加性高斯白噪声(AWGN)信道的方法, 得到了系统在接收端信噪比的表达式。然后对不同条件下的系统的平均符号误码率(ASEP)性能做了仿真, 仿真结果表明: 本文所提出的方案, 能够显著改善系统的性能, 使系统的平均符号误码率大大降低, 从而能够缓解发展中的深空通信中将会遇到的功率受限和频带紧张问题。

## 关键词

发射天线选择, 正交空时分组码, 深空通信, 平均符号误码率

## 1. 引言

深空通信是指地球上的实体与月球及月球以外宇宙空间中的航天器之间的通信[1]-[3]。在深空探测任务中, 通信系统肩负着传输指令信息、遥测遥控信息、跟踪导航信息、姿态控制、轨道控制等信息和传输科学数据、图像、文件、声音等数据的任务。从这个意义上讲, 离开了深空通信, 深空探测就无法进行[4]。

深空通信具有通信距离远、链路间歇性、上下行链路传输速率不对称、高信息容量和高数据传输速率、数据传输可靠性要求极高等特点。为了解决深空通信中特殊的问题, 如传输时延大、前向与反向链路容量不对称、射频通信信道链路误码率高等, 一些关键技术受到了广泛的关注。这些关键技术主要有: 天线组阵技术、高效调制解调技术、信道编码和传输层协议技术、信源编码和数据压缩技术、通信协议。

深空通信中存在的多普勒频移和由太阳闪烁引起的多径效应, 使深空信道具有时变衰落特性。为了获得更高的探测灵敏度, 需要采用各种分集接收技术(包括空间、频率、时间、极化分集)。使用多个天线组成阵列对信号进行分集接收, 已经成为深空测控的发展方向[5]-[8]。多输入多输出(MIMO)技术使用多个发送天线和接收天线, 可以显著提高系统的容量和改善无线传输链路的质量而不增加系统的带宽。MIMO 技术已经成为无线通信领域的研究热点, 尤其在信道相关的测量、建模和信道编码方面有了广泛的学术成果[9]-[13], 受到越来越多的关注。空时编码(STBC)技术就是利用多根发射天线有效地实现了空间分集, 尤其正交空时分组码以较低的译码复杂度获得了完全的分集增益。然而, 典型的 MIMO 系统中发射机和接收机同时使用所有的天线发射和接收, 这就要求使用与天线一样多的射频链路, 大大增加了系统的硬件成本, 而且空时编码、检测译码等信号处理的复杂度也会大幅度提高。发射天线选择(TAS)技术由于用相对较少的收发射频链路支持较多的天线, 更好地利用收发天线单元, 大幅削减硬件成本, 并且降低信号处理的复杂度, 引起人们极大的关注。为了充分利用 TAS 和 STBC 的优点, 文献[14]提出了 TAS/STBC 方案, 选择两根发射天线的系统称为 TAS/Alamouti。文献[15] [16]利用矩生成函数(MGF)的方法, 研究了在瑞利衰落信道下 TAS/STBC 系统使用相干检测的 BFSK、M 进制相移键控(MPSK)和方形 M 进制正交幅度调制(MQAM)的平均误码率的精确闭合表达式及其性能上限。

深空通信传输时延大, 无法利用应答方式保证数据传输的可靠性。合适的编码调制体制对保障深空

通信的可靠高效运行起着十分重要的作用。纠错编码是一种有效提高功率利用率的方法，典型方案是以卷积码作为内码，里德-所罗门码作为外码的级联码。2003年具有接近香农极限纠错能力的 Turbo 码在“先进技术研究小型任务”月球探测器上的使用，使得深空通信的可靠性得到很大程度的提高。Turbo 码由于很好地应用了香农编码定理中的随机编译码条件而获得了接近香农理论极限的译码性能，但更重要的是其译码更加简单。目前，Turbo 码已被多个标准如 CDMA2000、WCDMA 和 DVB-RCS (digital video broadcast-return channel satellite)系统采用，下一代 NASA 深空雷达接收系统已将其列入信道编码方案。因此 Turbo 码被广泛的应用在深空通信中[17][18]。

根据笔者目前的资料，研究信道编码与调制解调技术级联的编码调制体制的文献比较多，但是对深空通信中 MIMO 技术的研究很少。本文针对这个问题，将编码调制体制与发射天线选择，空时编码相结合，提出了一种基于 TAS/STBC 的深空通信系统的方案。此方案基于标量 AWGN 信道的方法[19]，在可变参数 Rician 衰落信道下分析了深空通信系统的 ASEP 性能，得到了系统在接收端信噪比的表达式。然后对不同系统条件下 ASEP 性能做了仿真和分析，验证了分析结果的正确性。

## 2. 深空信道模型

由于深空通信中的宇宙背景噪声可以看作高斯白噪声，在这种理想的自由空间通信环境下，早期的深空通信信道常建模为理想的AWGN信道。但是在深空中传播，信号由于受到太阳粒子的干扰，以及大气层对电波的散射、电离层对电波的反射和折射，还有山峦、建筑等地表物体对电波的反射产生了多径效应，使得深空通信信道较为复杂；另外，探测器的高速运动也导致了多普勒频移，再加上路径损耗等影响，使得接收信号的统计特性可用多径传输模型来建模。文献[20]通过工程测试数据对深空通信信号包络进行了分析，得出了信号包络统计特性服从Rician分布，将深空信道描述为Rician信道。文献[21]基于深空通信在宇宙空间中传输存在着时变衰落，多普勒频移和时延，建立了可变参数AWGN信道模型，是当前研究深空信道较为普遍的模式。文献[22]在总结前人研究的基础上，结合太阳-地球-探测器(SEP)夹角变化对信道特性的影响，通过闪烁指数(scintillation index)与Rician因子建立了联系，进而建立了能够较为准确反映深空通信信号在传输过程中的衰落特性的可变参数Rician信道模型。因此，本文就采用了文献[22]中的可变Rician信道模型。

可变Rician信道分布的概率密度函数可以表示为

$$p_{\text{rician}}(r) = \frac{r}{(\sigma^2)} e^{-(s^2+r^2)/2\sigma^2} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

式中， $s^2$ 为散射路径传输的信号平均功率， $I_a(x)$ 是第一类 $a$ 阶修正贝塞尔函数。Rician因子 $K = s^2/\sigma^2$ ， $K$ 与闪烁指数 $m$ 之间关系为[23]

$$K = \frac{\sqrt{1-m^2}}{1-\sqrt{1-m^2}}, \quad 0 < m < 1 \quad (2)$$

当  $m$  趋近 0 时， $K$  趋近于  $\infty$ ，此时信道近似为高斯白噪声(AWGN)信道；当  $m$  趋近 1 时， $K$  趋近于 0，此时信道近似为 Rayleigh 信道，这也是与实际深空信道中星体通信的空间位置状态相对应的。

## 3. 深空通信系统模型

本文使用 Turbo 信道编码和 QPSK 调制的级联编码调制。然后将此级联编码调制与发射天线选择,空时编码相结合，提出了一种基于 TAS/STBC 的深空通信系统的方案。下面我们对基于 TAS/STBC 的深空通信系统的方案进行说明，图 1 是深空通信系统的发射机框图，图 2 是深空通信系统的接收机框图。

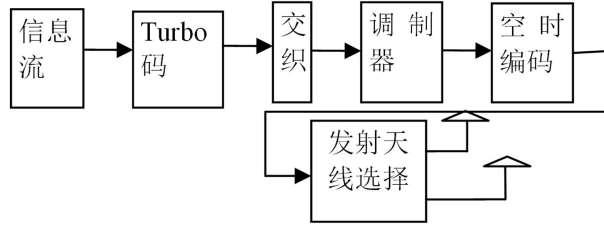


Figure 1. The transmitter block diagram of deep space communication system

图 1. 基于 TAS/STBC 的深空通信系统的发射机框图

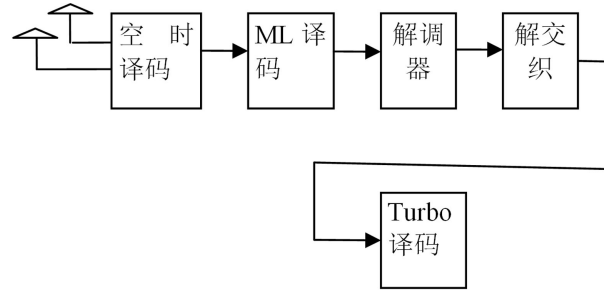


Figure 2. The receiver block diagram of deep space communication system

图 2. 基于 TAS/STBC 的深空通信系统的接收机框图

本文在 Turbo 信道编码和 QPSK 调制之间加入交织器,把码流按一定的规则进行打乱,然后再传送。这样做是因为在传输环境较为恶劣,错误比较严重时,导致突发性错误的可能性较大,通过交织,就可以把原来成串的误码分散,把突发性错误转化为随机性错误,使得分散后的误码个数落在纠错解码范围之内,从而可以把传输过程中产生的误码纠正过来。

一个基于 TAS/STBC 方案的深空通信系统,有  $K$  根发射天线,  $M$  根接收天线,每对天线之间的无线信道是相互独立的。我们假设接收端可以获得理想信道状态信息(CSI),发射端未知信道信息,接收端根据 CSI 从  $K$  个发射天线中选择使接收信噪比(SNR)最大的  $N$  根发射天线进行 STBC 编码,每次信道使用的总发射功率  $E_s$  在选定的  $N$  个天线上平均分配。输入的信息序列首先经过 Turbo 信道编码,交织以后使用 QPSK 进行调制,输出的  $S$  个符号经过 STBC 编码后在  $T$  个时隙内由选择出的  $N$  个天线发射出去。深空通信系统的信道矩阵用  $\mathbf{H}$  表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & \cdots & h_{M,N} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{H}_{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{H}_{\text{sc}} \quad (3)$$

其中元素  $h_{ij}$  表示发射天线  $j$  到接收天线  $i$  的复路径增益,服从可变Rician信道分布。 $\mathbf{H}_{\text{LoS}}$  为 LoS 信号的信道矩阵,  $\mathbf{H}_{\text{sc}}$  为散射信号的信道矩阵,它的各个元素均服从零均值的复高斯分布,且相互独立。

接收端的信号可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{W} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{Y}$  是  $M \times T$  维的接收信号矩阵,  $\mathbf{X}$  是  $N \times T$  维的发射信号矩阵,  $\mathbf{W}$  是  $M \times T$  维的复高斯白噪声矩阵,其方差是  $N_0/2\mathbf{I}_M$ ,  $\mathbf{I}_M$  是  $M \times M$  维的单位矩阵,  $N_0$  是功率谱密度。

在接收端,在进行最大似然译码前,我们基于标量 AWGN 信道的方法[17],将(4)式中的矩阵信道转化成标量 AWGN 信道,接收信号可以表示为

$$\mathbf{y}_0 = \|\mathbf{H}\|_F^2 \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (5)$$

考虑STBC的编码速率, 用 $R$ 表示, 接收信号可以表示为

$$\mathbf{y}_0 = \frac{1}{R} \|\mathbf{H}\|_F^2 \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (6)$$

$\mathbf{y}_0$ 是 $S \times 1$ 维的接收信号矩阵,  $\mathbf{x}$ 是经过信道编码和QPSK调制的 $S \times 1$ 维的发射信号矩阵,  $\mathbf{w}$ 是 $S \times 1$ 维的复高斯白噪声矩阵, 其每一维的期望是0, 方差是 $1/R \times \|\mathbf{H}\|_F^2 \times N_0/2$ 。

因此接收端的比特信噪比可以用 $r_0$ 表示为

$$r_0 = \frac{E_s}{NRN_0 \log_2(q)} \|\mathbf{H}\|_F^2 \quad (7)$$

我们用 $h_0$ 进行一下替换, 即

$$h_0 = \frac{1}{R} \|\mathbf{H}\|_F^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{1}{R} \|h_{ij}\|^2 \quad (8)$$

则(6), (7)式可以表示为

$$\mathbf{y}_0 = h_0 \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (9)$$

$$r_0 = \frac{E_s}{KN_0 \log_2(q)} h_0 \quad (10)$$

发射天线选择的准则是使接收端的接收信噪比(SNR)最大, 这样可以减小误码率。我们由(10)式可以得到, 接收信噪比 $r_0$ 最大, 则 $h_0$ 最大, 所以当从 $K$ 根发射天线中选出 $N$ 根时, 共有 $K!/(N!)(K-N)!$ 种选择,  $z$ 表示其中的一种选择, 那么最佳的发射天线选择可以表示

$$N = \arg \max \left( \sum_{i=1}^M \frac{1}{R} \|h_{iz}\|^2 \right), z \in \binom{K}{N} \quad (11)$$

#### 4. 数值仿真

我们将此基于TAS/STBC的深空通信系统简记为 $(K, M; N \times M)$ 。Turbo码的参数如下: 分组长度为1256 bits, 迭代了8次, 交织器使用S交织器, 译码算法使用Log-MAP算法。

图3给出了基于TAS/STBC方案的深空通信系统在可变莱斯信道下, 使用QPSK调制方式, 系统的ASEP性能随总发射信噪比变化的曲线。发射天线数目 $K$ 分别取3、4、5根, 接收天线数目 $M$ 分别取2、3、4根, 从 $K$ 中选择 $N$ 根发射天线, 其中 $N$ 取2根发射天线。可变莱斯因子 $K=4$ 。我们可以看到, 系统的ASEP随着发射信噪比的增加而不断降低, 如(5, 4; 8)系统的误码率在-1 dB时为 $2 \times 10^{-4}$ , 在0 dB时为 $1 \times 10^{-6}$ 。仿真结果显示: 随着发射天线数或接受天线数的增加, 系统的ASEP性能是不断改善的。例如, 当 $\text{SNR} = 0$  dB, (3, 2; 4)系统的误码率是 $7 \times 10^{-2}$ , (4, 3; 6)系统的误码率是 $3 \times 10^{-4}$ , (5, 4; 8)系统的误码率是 $1 \times 10^{-6}$ 。当ASEP为 $10^{-4}$ 时, (5, 4; 8)系统所需的发射信噪比比(4, 3; 6)系统改善了大约1.2 dB, 比(3, 2; 4)系统改善了大约5.6 dB。

图4给出了基于TAS/STBC方案的深空通信系统分别在可变莱斯信道, 瑞利信道, AWGN信道下, 使用QPSK调制方式, 系统的ASEP性能随总发射信噪比变化的曲线。可变莱斯信道分为3种情况, 闪烁指数 $m$ 分别取值为0.1, 0.5, 0.9。发射天线数目 $K$ 取3根, 接收天线数目 $M$ 取3根, 从 $K$ 中选择 $N$ 根发射天线, 其中 $N$ 取2根发射天线。仿真结果显示: 当 $m$ 取值为0.1时, 深空通信系统在可变Rician信道下的ASEP性能和AWGN信道的性能接近, 二者的差距很小; 当 $m$ 取值为0.5, 0.9时, 深空通信



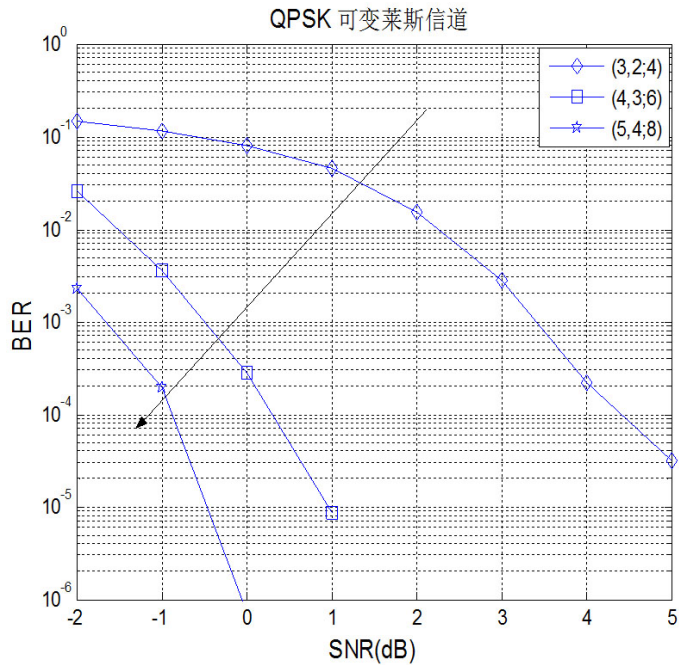


Figure 3. The ASEP performance of deep space communication system with QPSK

图 3. 采用 QPSK 调制的深空通信系统的平均误码率性能

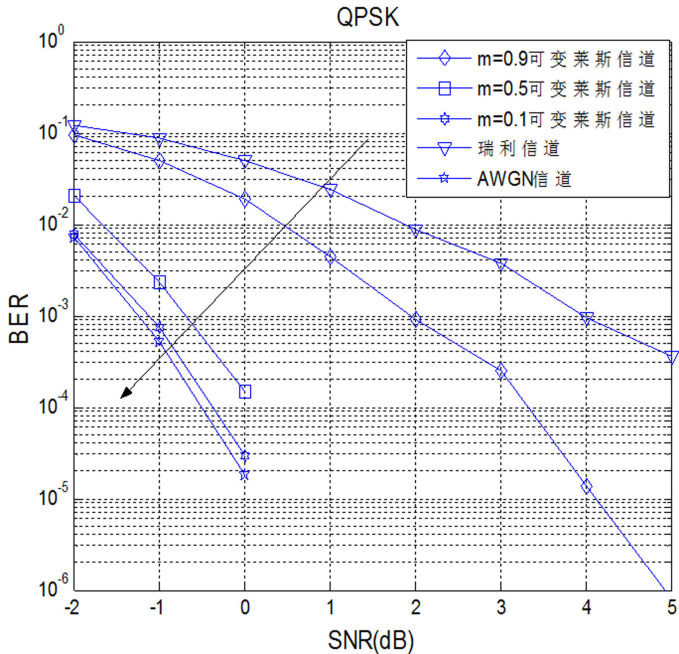


Figure 4. The ASEP performance of deep space communication system in different channels

图 4. 深空通信系统在不同信道下的平均误码率性能

系统在可变 Rician 信道下的 ASEP 性能，随着  $m$  的不断增大，与 AWGN 信道的性能的差距越来越大，但是要优于 Rayleigh 信道的性能。在可变 Rician 信道下，随着  $m$  的不断增大，深空通信系统的 ASEP 性能是逐渐变差的，例如，当 SNR = 0 dB,  $m$  取值为 0.1, 深空通信系统的误码率是  $2 \times 10^{-5}$ ,  $m$  取值为 0.5,

深空通信系统的误码率是  $1.5 \times 10^{-4}$ ,  $m$  取值为 0.9, 深空通信系统的误码率是  $2 \times 10^{-2}$ 。

## 5. 结束语

为了进一步改善系统性能, 本文提出了一种级联 Turbo 信道编码和 QPSK 调制的使用发射天线选择(TAS)和正交空时分组码(STBC)的深空通信系统的方案。在可变参数 Rician 衰落信道下, 基于标量的加性高斯白噪声(AWGN)信道的方法, 得到了系统在接收端信噪比的表达式。然后对不同条件下的系统的平均符号误码率(ASEP)性能做了仿真, 仿真结果表明: 本文所提出的方案, 能够显著改善系统的性能, 使系统的平均符号误码率大大降低。当  $m$  趋近 0 时, 深空通信系统在可变 Rician 信道下的 ASEP 性能和 AWGN 信道的性能接近, 二者的差距很小; 随着  $m$  的不断增大, 深空通信系统在可变 Rician 信道下的 ASEP 性能, 与 AWGN 信道的性能的差距越来越大, 但是要优于 Rayleigh 信道的性能; 当  $m$  趋近 1 时, 深空通信系统在可变 Rician 信道下的 ASEP 性能和 Rayleigh 信道的性能接近, 二者的差距很小。

## 项目基金

青岛市国际科技合作项目(No. 12-1-4-137-hz)。

## 参考文献 (References)

- [1] 周贤伟, 尹志忠, 王建萍, 等 (2009) 深空通信. 国防工业出版社, 北京.
- [2] 张更新, 谢智东, 沈志强 (2010) 深空通信的现状与发展. *数字通信世界*, **4**, 82-86.
- [3] 张乃通, 李晖, 张钦宇 (2011) 深空探测通信技术发展趋势及思考. *宇航学报*, **192**, 786-793.
- [4] 谢捷峰, 陈金鹰, 朱军, 王绪本 (2007) 深空通信特点与关键技术分析. *通信与信息技术*, **28**, 61-63.
- [5] 史学书, 王元钦 (2010) 深空大规模天线阵布局优化方法研究. *宇航学报*, **31**, 478-484.
- [6] 姚飞, 詹亚锋, 陆建华 (2012) 深空通信天线组阵上行链路性能. *清华大学学报*, **52**, 1255-1259.
- [7] 柴霖, 许秀玲 (2010) 深空测控体系结构与技术发展. *电讯技术*, **50**, 1-6.
- [8] 徐茂格, 柴霖 (2014) 我国深空天线组阵技术现状与发展思考. *电讯技术*, **54**, 109-114.
- [9] 张蕊, 张利军, 原梦钰, 等 (2011) 多输入多输出宽带时变信道分布散射模型研究. *电波科学学报*, **26**, 74-78.
- [10] 梁彦, 束锋, 张一晋, Stevan, B. (2013) 稀疏多径信道环境中 MIMO-OFDM 系统的 IQ 不平衡和信道联合估计. *电子与信息学报*, **35**, 280-284.
- [11] 刘留, 陶成, 邱佳慧, 等 (2011) 高速铁路宽带无线信道测量方法研究. *铁道学报*, **33**, 48-53.
- [12] 周涛, 陶成, 刘留, 孙溶辰, 谈振辉 (2012) 基于 WCDMA 的高铁宽带无线信道测量方法研究. *铁道学报*, **34**, 55-60.
- [13] 王铠尧, 肖扬 (2013) 基于原模图 LDPC 码的多用户 MIMO 干扰消除. *铁道学报*, **35**, 37-43.
- [14] Gore, D.A. and Paulraj, A.J. (2002) MIMO antenna subset selection with space-time coding. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **50**, 2580-2588.
- [15] Yang, L. and Qin, J. (2007) Performance of Alamouti Scheme with Transmit Antenna Selection for M-ary Signals. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **11**, 423-425.
- [16] Kaviani, S.T. and Ellambura, C. (2006) Closed-Form BER Analysis for Antenna Selection Using Orthogonal Space-Time Block Codes. *IEEE Communication Letters*, **10**, 704-706.
- [17] 张佳岩, 周廷显 (2006) 深空通信中基于 Turbo 码的混合 ARQ 方案. *南京理工大学学报*, **30**, 733-738.
- [18] 陈炳才, 周廷显, 聂伯勋 (2004) 深空通信中的 Turbo 码技术. *遥测遥控*, **25**, 32-37.
- [19] Sandhu, S. and Paulraj, A. (2000) Space-Time Block Codes: A Capacity Perspective. *IEEE Communication Letters*, **4**, 384-386.
- [20] Morabito, D.D. (2003) The Cassini May 2000 Solar Conjunction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **51**, 201-219.

- [21] 张永富, 杜建超, 肖嵩 (2010) 可变参数 AWGN 深空信道模型特性分析及其仿真. *空间电子技术*, **7**, 22-25.
- [22] 刘强, 梅进杰, 姚云龙, 等 (2012) 深空信道模型特性分析及其仿真. *空军雷达学院学报*, **26**, 181-184.
- [23] Chytil, B. (1967). The Distribution of Amplitude Scintillation and the Conversion of Scintillation Indices. *Atmospheric and Terrestrial Physics*, **29**, 1175-1177.