

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.04.021

引用格式:肖创创,郭荣海,李际平,等.直升机卫星通信系统中 Turbo 码外交织器设计与仿真[J].电讯技术,2014,54(4):486-490. [XIAO Chuang-chuang, GUO Rong-hai, LI Ji-ping, et al. Design and Simulation of Turbo Codes' Interleaver in Helicopter Satellite Communication System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(4):486-490.]

# 直升机卫星通信系统中 Turbo 码外交织器设计与仿真\*

肖创创<sup>1,\*\*</sup>, 郭荣海<sup>1</sup>, 李际平<sup>1</sup>, 吴团锋<sup>1</sup>, 黄尧<sup>1</sup>, 李洪胜<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学 通信工程学院, 南京 210007; 2. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210007)

**摘要:**在直升机卫星通信系统(HSCS)中,如何克服由于旋翼遮挡导致的系统性能恶化是一个亟需解决的关键问题。旋翼遮挡相当于对码字信息的成片删除,通过分析删余 Turbo 码中删余矩阵的设计准则,首先对 Turbo 码的编码结构进行改进,并提出了一种适用于直升机旋翼遮挡环境下的交织器。它满足以下特性:将删除均匀分散在整个码字序列中,变突发错误为随机错误;码字中每个信息位与其对应的 2 比特校验位中最多只删 1 位;与被删比特组相邻的两个比特组保留;删除部分中以信息位-校验位 1-校验位 2 的模式循环,这些特性保证了删除信息的可靠恢复。最后对不同遮挡比例下新型交织器与传统交织器进行仿真比较,结果表明采用新型交织器改善了数据传输的误码率(BER)性能,提高了 HSCS 系统的可靠性。

**关键词:**直升机卫星通信系统;旋翼遮挡;突发错误;删余 Turbo 码;交织器设计

**中图分类号:** TN927.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-893X(2014)04-0486-05

## Design and Simulation of Turbo Codes' Interleaver in Helicopter Satellite Communication System

XIAO Chuang-chuang<sup>1</sup>, GUO Rong-hai<sup>1</sup>, LI Ji-ping<sup>1</sup>, WU Tuan-feng<sup>1</sup>, HUANG Yao<sup>1</sup>, LI Hong-sheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. School of Electronic and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In Helicopter Satellite Communication System(HSCS), the rotor shield will result in the deteriorative performance of the system. The codes can be partly punctured by the rotor shield and it is an imperative problem. Through the analysis of the punctured Turbo codes, a new interleaver which can be well applied in this system is proposed. The characters that the interleaver satisfies include (1) dispersing the punctured code chips among all the chips and turning burst errors into random errors, (2) both systematic and parity outputs of the same information bit should be deleted only one bit, (3) reserving the neighborhoods of the punctured bit field, (4) the punctured bits should follow the cycle model of systematic bit—the first parity bit—the second parity bit. Finally, comparison between the new pattern interleaver and the conventional ones shows that the former one makes the code's bit error rate(BER) performance obtain more amelioration and improves the HSCS' communication reliability.

**Key words:** helicopter satellite communication system(HSCS); rotor shield; burst error; punctured Turbo code; interleaver design

### 1 引言

我国地质、气象等严重自然灾害频发,给国家和

人民的生命财产造成了巨大损失。此时,迫切需要一种能够快速机动、远距离、实时地进行信息传输的

\* 收稿日期:2013-12-10;修回日期:2014-02-22      Received date:2013-12-10;Revised date:2014-02-22

\*\* 通讯作者:xcc8057@163.com      Corresponding author:xcc8057@163.com

机动通信系统。直升机卫星通信系统 ( Helicopter Satellite Communication System, HSCS ) 具有实时快速、机动灵活、不受地理条件限制等特点,且不需要地面中继站和中继车,就可通过静止轨道的通信卫星将直升机拍摄到的高质量的电视信号实时传输到地面上,在救灾中作为空中救援平台得到了大量应用。

Turbo 码一般采用删余处理提高码率<sup>[1]</sup>,好的删余方案在提高码率的同时又能够减小码字性能的损失。Turbo 码的各个部分组成一个有机的整体,文献 [2] 提出一种结合删余方案和交织器的综合设计方案,该方案在删余条件下获得了优异的译码性能。

文献 [3] 详细分析了直升机与卫星通信过程中直升机旋翼对信号的遮挡规律,并提出一种结合 Turbo 码不等保护特性改善旋翼遮挡下的码字性能的方案。文献 [4,5] 中都采用了分集接收或组帧重发策略来有效抵抗旋翼遮挡,但信道利用率普遍不高。

为了更好地解决直升机旋翼对信号造成的遮挡问题,本文在详细研究删余 Turbo 码 ( Punctured Turbo Code, PTC ) 的相关技术之后提出了设计优异的删余矩阵的 3 个准则,并分析比较了利用外交织器分散遮挡码片之后的码字和删余 Turbo 码的相似性。然后,通过对 Turbo 编译码结构的改进设计,更加方便地实现了改进的外交织器的设计。改进的外交织器的引入,有效地分散了成片遮挡,而且能够满足设计优异的删余 Turbo 的全部要求。仿真结果表明,该设计方案能够有效抵抗 HSCS 中旋翼遮挡带来的干扰。

## 2 系统模型

Turbo 码结合外交织器抵抗旋翼遮挡的通信系统框图如图 1 所示。由图可知,为了抵抗远距离传输的损耗,直升机产生的数据首先采用 1/3 码率 Turbo 码进行编码,在编码之后级联了一个交织器来抵抗旋翼遮挡,本文为了区别于编码器内部的交织器,这里称之为外交织器。

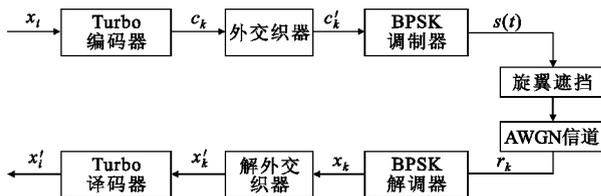


图 1 系统工作方框图

Fig. 1 The system block diagram

能安装在直升机旋翼下方。因此,它存在一个旋翼遮挡问题,即直升机与卫星进行通信时,直升机桨叶会对电磁波信号造成阻挡,引起通信信号的中断。尤其是在地面站向机载站发送信息时,无法预知机载站的天线遮挡情况,如图 2 所示。

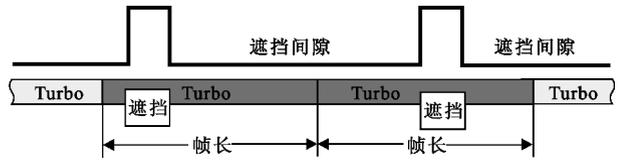


图 2 旋翼遮挡示意图

Fig. 2 The rotor shield diagram

在实际通信过程中,旋翼扫过天线的频率约为 15 ~ 20 次/秒,由于信息传输速率和码字长度的不同,每次会遮挡掉码字的 1/10 ~ 1/6,对文献 [3] 的遮挡模型进一步简化,公式 (1) 给出了本文使用的旋翼遮挡数学模型:

$$S(k) = \begin{cases} 0, & k \in A \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $A = (c_m, c_m + 1, \dots, c_m + \lfloor \delta \times l \rfloor)$ ,  $l$  表示 Turbo 码一个码字序列的长度,  $\delta$  为遮挡比例,  $\delta \times l$  为整个码字序列中被遮挡比特的总个数,  $m$  为该码字被遮挡的随机起始位置,取值范围  $0 \sim (l - \delta \times l)$ ,  $c_m$  表示遮挡的起始位置的码字比特。仿真实现时,随机遮挡一段位置是通过对被遮挡的码字的调制符号位置乘以上式来实现,改变  $\delta$  取值可以调整遮挡占空比。采用 BPSK 调制时,则发送码字  $c'_k$  与接收符号  $r_k$  之间的关系为

$$r_k = S(k) \times (2c'_k - 1) + n_k \quad (2)$$

式中,  $n_k$  是均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的高斯噪声采样。

由文献 [3] 可知,旋翼遮挡级联 AWGN 信道相当于具有突发错误的信道,而且突发错误是周期性持续地产生。常规 Turbo 码自身编译码结构中的交织器对于此类不断周期性出现的突发错误基本上没有任何效果;一般的信道交织器虽然是将多个码字交织打乱,能够将遮挡码片分散开,但它并不能很好地解决这一周期性出现的突发错误,而且交织的深度越大,信道交织带来的系统时延也就越大。

本文在发送码字序列之前采用一种针对单个码字处理的外交织器,它对编码数据进行交织,使码字序列打乱,将突发错误随机化。接收端对接收数据进行解交织,将突发错误变为随机错误,有助于更好地发挥 FEC (Forward Error Correction) 的优势,提高传输系统可靠性。

由于受直升机安装条件限制,收发天线一般只

### 3 系统设计

系统工作在旋翼遮挡环境下时, 遮挡删除与删余 Turbo 码中删余矩阵的设计考虑相一致。将直升机旋翼遮挡与删余 Turbo 码相联系, 通过改进 Turbo 码结构, 设计出与之匹配的交织器。

#### 3.1 改进的 Turbo 码结构

为便于与下面设计的交织器匹配, 在基本不改变编译码复杂度的情况下, 对 Turbo 码编码器结构进行改进, 在第二分量编码器后级联一个解交织器, 如图 3 所示。

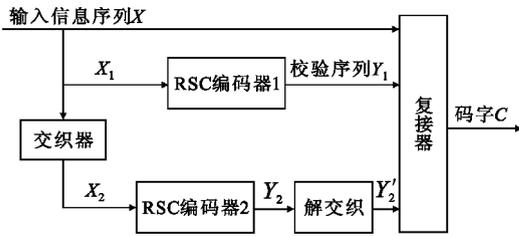


图 3 改进的 Turbo 码编码结构  
Fig. 3 Improved Turbo codes coding structure

设为  $N$  的信息序列经过码率为  $1/3$  的 Turbo 编码器后, 码字  $C$  包含 3 个序列, 即系统信息序列、分量编码器 1 对应的校验序列和分量编码器 2 输出后经解交织后的校验序列:

$$X = (x_{(1)} \ x_{(2)} \ \dots \ x_{(N-1)} \ x_{(N)}) \quad (3)$$

$$Y_1 = (y_{1(1)} \ y_{1(2)} \ \dots \ y_{1(N-1)} \ y_{1(N)}) \quad (4)$$

$$Y'_2 = (y'_{2(1)} \ y'_{2(2)} \ \dots \ y'_{2(N-1)} \ y'_{2(N)}) \quad (5)$$

通常, 码字序列  $C$  表示为

$$C = (x_{(1)} \ y_{1(1)} \ y'_{2(1)} \ \dots \ x_{(N)} \ y_{1(N)} \ y'_{2(N)})$$

通过在第二个分量码后级联一个解交织器, 使得输出序列  $Y'_2$  也具有和输入信息序列  $X$  相同的比特顺序, 保证  $(x_{(1)} \ y_{1(1)} \ y'_{2(1)})$  是直接相关的。经过这样处理, 简化了码字分析, 为下一步外交织器的设计带来方便。

为了保证译码的正确性, 分量译码器 2 在输入校验位之前还需要经过一次交织处理, 这里不再给出相应的结构框图。当 Turbo 码编译码作为一个整体分析时, 该处理方法不会造成任何的性能损失。

$$B_1 = \begin{bmatrix} x_{(1)} \ y_{1(3)} \ y'_{2(5)} \ \dots \ x_{(k)} \ y_{1(k+2)} \ y'_{2(k+4)} \ \dots \ x_{(2m-1)} \ y_{1(2m-3)} \ y'_{2(2m-5)} \\ y_{1(1)} \ y'_{2(3)} \ x_{(5)} \ \dots \ y_{1(k)} \ y'_{2(k+2)} \ x_{(k+4)} \ \dots \ y_{1(2m-1)} \ y'_{2(2m-3)} \ x_{(2m-5)} \\ y'_{2(1)} \ x_{(3)} \ y_{1(5)} \ \dots \ y'_{2(k)} \ x_{(k+2)} \ y_{1(k+4)} \ \dots \ y'_{2(2m-1)} \ x_{(2m-3)} \ y_{1(2m-5)} \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} x_{(2)} \ y_{1(4)} \ y'_{2(6)} \ \dots \ x_{(k')} \ y_{1(k'+2)} \ y'_{2(k'+4)} \ \dots \ x_{(2m)} \ y_{1(2m+2)} \ y'_{2(2m+4)} \\ y_{1(2)} \ y'_{2(4)} \ x_{(6)} \ \dots \ y_{1(k')} \ y'_{2(k'+2)} \ x_{(k'+4)} \ \dots \ y_{1(2m)} \ y'_{2(2m+2)} \ x_{(2m+4)} \\ y'_{2(2)} \ x_{(4)} \ y_{1(6)} \ \dots \ y'_{2(k')} \ x_{(k'+2)} \ y_{1(k'+4)} \ \dots \ y'_{2(2m)} \ x_{(2m+2)} \ y_{1(2m+4)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### 3.2 外交织器设计

删余 Turbo 码由于码字中信息位或者校验位被部分删除, 码字性能往往都会有所下降。好的删余矩阵能够使码字的性能在删余前后变化不大, 在删余时往往需要遵循一定的规则:

(1) 每个输入的信息比特对应的 3 个编码比特 (1 个信息位和 2 个校验位) 应尽可能地保证最多只有一个比特位被删除;

(2) 删余矩阵要保证整个删余过程尽可能地均匀化, 而且相邻和相近的编码比特被删除的信息位或校验位位置不同。

仔细比较删余和遮挡这两种情况我们不难发现, 它们最大的不同在于 PTC 删除掉的比特信息位置是确切已知的, 而遮挡造成的信息缺失却是不可预知的。虽然如此, 但就像删余矩阵在满足一定设计准则时能够克服部分信息缺失一样, 如果我们能够设计出足够好的外交织器, 使得在遮挡位置不定的情况下, 被分散开的遮挡位置也能够满足这些删余准则, 这样就不必考虑遮挡位置的未知性, 码字仍能够获得较大的性能改善。因此, 我们可以采用对 PTC 的优化设计办法来分析和解决旋翼遮挡问题。

将编码输出数据按式 (7) 分成奇数组  $B_1$  和偶数组  $B_2$ , 其中  $k$  为奇数,  $k'$  为偶数。  $B_1$  和  $B_2$  两组数据内每一行按照前三列的模式进行扩展, 最后  $B_1$  和  $B_2$  按行输出并串行连接起来组成交织后的输出序列  $D$ , 如式 (8) 所示:

$$D = (x_{(1)}, \ y_{1(3)}, \ y'_{2(5)}, \ \dots, \ y'_{2(N-4)}, \ x_{(N-2)}, \ y_{1(N)}) \quad (8)$$

在根据交织器的定义式, 所设计改进的外交织器称为  $I$ , 它可以看成从集合  $C$  到集合  $D$  的一个映射过程, 即

$$I: C \rightarrow D \quad (9)$$

当遮挡比例小于  $1/6$  时, 所设计的交织器  $I$  可以满足:

(1) 每个比特组中最多只有 1 位被删除, 即  $(x_{(k)}, \ y_{1(k)}, \ y'_{2(k)})$  中最多 1 位被删除;

(2) 前后相邻比特组保留, 即如果  $(x_{(k)}, \ y_{1(k)}, \ y'_{2(k)})$  中有 1 比特被删除, 则  $(x_{(k-1)}, \ y_{1(k-1)}, \ y'_{2(k-1)})$  和  $(x_{(k+1)}, \ y_{1(k+1)}, \ y'_{2(k+1)})$  中的比特信息均不被删除;

(3) 遮挡部分任意连续 3 个比特中包含 1 个信息位、1 个第一校验位和 1 个第二校验位。

因此, 所设计的交织器满足删余 Turbo 码的删余规则, 使得信号经过遮挡后可以被最大可能地恢复。

### 4 性能仿真

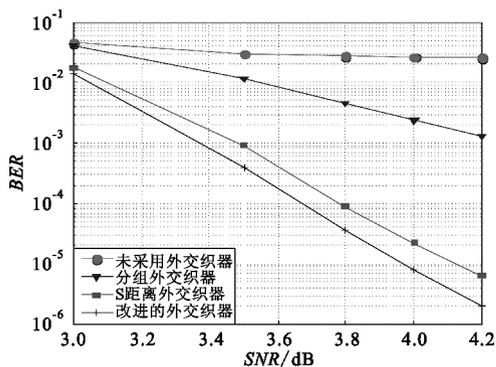
下面对不同码长、不同遮挡比例下, 未采用外交

织器与采用外交织器时的系统性能进行计算机仿真比较。系统仿真参数如表 1 所示。

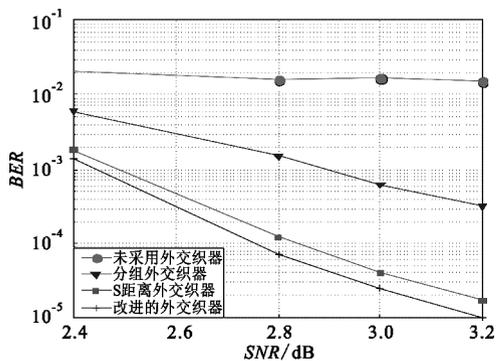
表 1 仿真参数设定  
Table 1 Simulation parameters

参数	外交织长度 1536	外交织长度 3072
信息长度	512	1024
内交织器	S 交织器, S=9;	S 交织器, S=14;
生成矩阵	(15,17)	
译码算法	Max-Log-MAP	
迭代次数	10	
外交织器	未采用外交织器;分组外交织器; S 距离外交织器;改进的外交织器	
遮挡比例	1/10 或 1/6	

图 4 和图 5 分别给出了不同遮挡比例、不同外交织长度条件下的 4 种外交织器 BER 性能比较曲线,由图可以看出,未采用外交织器的 BER 随信噪比变化很小而且一直保持在  $10^{-2}$  这个数量级,使得码字不能有效地抵抗旋翼遮挡。相比较而言,其他 3 种交织器的采用在一定程度上提高了码字抵抗旋翼遮挡的能力,其中改进的外交织器性能最好,其次是 S 距离交织器,普通分组交织器性能最差。

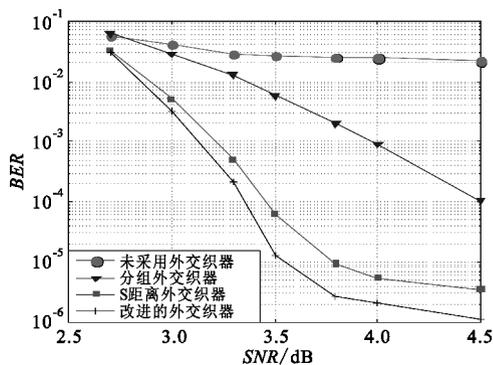


(a) 遮挡比例为 1/6

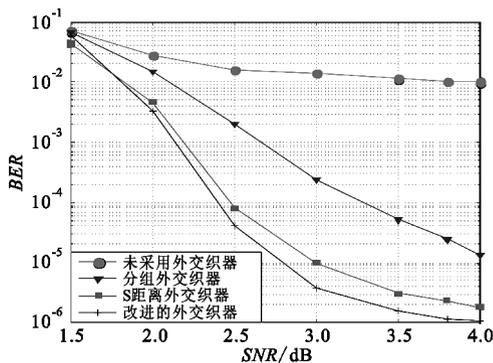


(b) 遮挡比例为 1/10

图 4 码长 1536,不同遮挡比例时外交织器 BER 性能曲线  
Fig.4 Outer interleavers' performance comparison under different shade when code length is 1536



(a) 遮挡比例为 1/6



(b) 遮挡比例为 1/10

图 5 码长 3072,不同遮挡比例时外交织器的 BER 性能曲线  
Fig.5 Outer interleavers' performance comparison under different shade when code length is 3072

分别对比图 4 和图 5 可以看出,在遮挡比例为 1/6、误码率大于等于  $10^{-4}$  时,改进的外交织器比 S 距离交织器约有 0.1 ~ 0.5 dB 增益,比分组交织器更有 1 dB 以上增益;在遮挡比例为 1/10 时,改进的外交织器与 S 距离交织器性能相比也有类似结论。同时也可以看出,在遮挡比例相同的条件下,码字长度越长,改进的交织器与其他交织器相比,对码字性能的改进也就越大。

### 5 结论

为了减小旋翼遮挡对 HSCS 系统译码造成的影响,本文使用了外交织器,并在对编译码结构改进的基础上联合设计了一种改进的外交织器,它有效地分散了码字中的成片旋翼遮挡,使得离散化之后的码字能够很好地满足删余 Turbo 的设计要求,提高了码字性能。对未采用外交织器和分别采用分组交织、S 距离随机交织和改进的外交织器进行了仿真比较,结果表明,外交织器的引入确实提高了系统 BER 性能,而且和采用其他外交织器相比,改进的外交织器提高了译码性能,在一定程度上解决旋翼

遮挡对码字造成的干扰,提高了直升机卫星通信系统的可靠性,更为今后该方面课题的研究提供了借鉴。

## 参考文献:

- [1] Rowitch D N, Miltein L B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured turbo (RCPT) codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(6):948-959.
- [2] 柯德军,徐友云. 删余 Turbo 码的交织删余的综合设计研究[J]. 信息技术, 2006(11):5-8.  
KE De-jun, XU You-yun. Research on combining designs of interleaving and puncturing for punctured Turbo codes [J]. Information Technology, 2006(11):5-8. (in Chinese)
- [3] 肖创创. 直升机卫星通信的 Turbo 码不等保护技术 [J]. 军事通信技术, 2013, 34(3):21-24.  
XIAO Chuang-chuang. Technology of Turbo Codes' Unequal Protection Based on Helicopter Satellite Communication [J]. Journal of Military Communications Technology, 2013, 34(3):21-24. (in Chinese)
- [4] Sato M, Miura A, Taira S, et al. Ku-band helicopter satellite communications for on scene disaster information transmission [J]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004, 1(4):2792-2796.
- [5] 匡麟玲,倪祖耀,凡明清,等. 直升机宽带多媒体卫星通信中的信道预测与可变速率编码[C]//第八届卫星通信学术年会论文集. 北京:中国通信学会卫星通信委员会,2012:272-278.  
KUANG Lin-ling, NI Zu-yao, FAN Ming-qing, et al. Channel Prediction and Variable Rate Coding for Helicopter Broadband Multimedia Communications [C]//Proceedings of Eighth Satellite Communications Academic Essays. Beijing: China Institute of Communications, 2012: 272-278. (in Chinese)
- [6] Chatzigeorgiou I, Rodrigues M R D, Wassell I J, et al. A novel technique for the evaluation of the transfer function of punctured turbo codes [C]// Proceedings of 2006 International Conference on Communications. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006:1-5.
- [7] Blazek Z, Bhargava V K, Gulliver T A. Some results on partially systematic turbo codes [C]// Proceedings of 2002 Vehicular Technology Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2002:981-984.
- [8] Rosnes E, Ytrehus O. On the construction of good families of rate-compatible punctured turbo codes [C]// Proceedings of 2005 International Symposium on Information Theory. Adelaide, SA: IEEE, 2005:602-606.
- [9] 刘东华. Turbo 码原理与应用技术 [M]. 北京:电子工业出版社, 2004.

LIU Dong-hua. Turbo code principle and application technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2004. (in Chinese)

## 作者简介:



肖创创(1988—),男,陕西渭南人,2011年于西安电子科技大学获学士学位,现为解放军理工大学硕士研究生,主要研究方向为卫星通信和编码;

XIAO Chuang-chuang was born in Weinan, Shaanxi Province, in 1988. He received the B. S. degree from Xidian University in 2011. He is now a graduate student. His research interests include satellite communication and channel coding.

Email: xcc8057@163.com

郭荣海(1987—),男,山西临汾人,解放军理工大学博士研究生,主要研究方向为卫星通信和编码;

GUO Rong-hai was born in Linfen, Shanxi Province, in 1987. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research interests include satellite communication and channel coding.

Email: guorhai@gmail.com

李际平(1962—),男,江苏无锡人,1983年于解放军理工大学获学士学位,现为教授,主要研究方向为通信理论与技术;

LI Ji-ping was born in Wuxi, Jiangsu Province, in 1962. He is now a professor. His research concerns communication theory and technology.

Email: Lijp62@163.com

吴团锋(1977—),男,陕西西安人,2005年于解放军理工大学获博士学位,现为解放军理工大学讲师,主要研究方向为卫星通信;

WU Tuan-feng was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1977. He received the Ph. D. degree from PLA University of Science and Technology in 2005. He is now a lecturer. His research concerns satellite communication.

Email: wtf\_chenxiao@163.com

黄尧(1990—),女,湖南湘潭人,解放军理工大学硕士研究生,主要研究方向为卫星通信;

HUANG Yao was born in Xiangtan, Hunan Province, in 1990. She is now a graduate student. Her research concerns satellite communication.

Email: 896652466@qq.com

李洪胜(1990—),男,山东菏泽人,南京邮电大学硕士研究生,主要研究方向为卫星通信。

LI Hong-sheng was born in Heze, Shandong Province, in 1990. He is now a graduate student. His researches direction is satellite communication.

Email: 58064110@qq.com