

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.012

引用格式:保骏,汪远玲. TDRSS 接收机码分多址干扰抑制方案设计[J]. 电讯技术,2015,55(5):533-538. [BAO Jun, WANG Yuanling. Scheme Design of Multiple Access Interference Suppression in TDRSS Receiver[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(5):533-538.]

TDRSS 接收机码分多址干扰抑制方案设计*

保 骏**,汪远玲

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:为了在跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)中实现码分多址(CDMA)应用,需要完成多用户检测(MUD)及码分多址干扰(MAI)抑制。采用减性多级迭代对消算法,在数字信号处理芯片中完成信号再生、延时校正、时域相减对消,可以完成至少 12 通道的多用户检测,并能将多址干扰抑制至最小 1 dB 以内。该算法可作为通用 MUD 算法的有效补充,并能应用于各类非最优的 CDMA 系统中,具有迭代级数可选、通道扩展性强、工程实现性好的优点。

关键词:跟踪数据中继卫星系统;测控通信系统;码分多址;多用户检测;码分多址干扰;迭代对消

中图分类号:TN927;V556.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)05-0533-06

Scheme Design of Multiple Access Interference Suppression in TDRSS Receiver

BAO Jun, WANG Yuanling

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: For the purpose of using the Code Division Multiple Access(CDMA) in the Tracking and Data Relay Satellite System(TDRSS), the Multi-user Detection(MUD) and the suppression of Multiple Access Interference(MAI) need to be completed. This paper proposes multilevel subtract iterative cancellation method to realize at least 12-channel MUD through the signal regeneration, time delay correction, cancellation in time domain in digital signal processing(DSP) chip, and suppress the MAI within 1 dB. This algorithm can be used as an effective supplement of MUD algorithm, and can be applied to all non-optimal CDMA systems. It has the advantages of setting iteration level by resource capacity, expanding signal channel easily, and applying to engineering easily.

Key words: tracking and data relay satellite system; TT&C system; code division multiple access; multi-user detection; multiple access interference; iterative cancellation

1 引 言

扩频体制具有支持多目标的特点,但基于航天应用特点,测控系统设计更偏重于抗干扰、抗侦察、高精度等方面,这必然难以兼顾多目标应用特性的码正交性、码片同步性、用户终端功率可控性等方面的要求。因此,如果需要在测控通信系统中完成多

目标任务,码分多址(CDMA)系统的几个原生缺陷将较通用地面通信系统更为明显,多用户联合检测、干扰抑制的成熟算法也不能直接应用。目前为止,多用户检测(MUD)技术的研究大多集中在地面 CDMA 移动通信系统中,而对于卫星测控通信中的应用则很少,在我国现有的中继卫星测控通信系统

* 收稿日期:2014-11-14;修回日期:2015-04-24 Received date:2014-11-14; Revised date:2015-04-24

** 通讯作者:tbaojun@139.com Corresponding author:tbaojun@139.com

中尚无多用户检测技术应用方面的文献报道。

本文以跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)单波束天线中的多目标应用为背景,以 CDMA 移动通信系统并行干扰对消算法的基本思想为基础,结合扩频测控通信系统信号特点,针对中继卫星 S 频段单址(SSA)返向扩频系统完成多目标扩频系统码分多址干扰(MAI)抑制算法设计,并在现有终端硬件平台上完成算法实现。

2 TDRSS 系统中码分多址干扰抑制需求分析

2.1 TDRSS 中的码分多址应用需求

TDRSS 利用位于地球同步轨道卫星进行中继传输,可以覆盖中、低轨航天器,具有较高的测控通信覆盖率。美国中继星配置了两副 Ku/Ka 频段 3 ~ 5 m 的高增益自跟踪天线和一副 S 频段相控阵多波束天线,结合码分多址技术,能对数十个目标同时测控通信。但鉴于目前我国的实际情况,在现阶段的

应用中迫切需要充分利用单波束天线的波束覆盖范围,实现多目标测控通信任务。由于单址天线中继系统架构的限制,很难克服码分多址干扰等 CDMA 系统的原生缺陷,目前即使有多目标的应用,仅能进行较低数据速率传输,目标数也不大于 3 个^[1]。当前需要在中继单址天线波束范围内同时跟踪至少 12 个码分目标,多址干扰抑制至最小 1 dB 以内。

2.2 码分多址信噪比恶化分析

系统中受多址干扰的影响,信噪比恶化和扩频增益、多址路数满足下式的关系^[2]:

$$\frac{E_b}{N_{oj}} = \frac{\frac{E_b}{N_o}}{1 + \frac{2(K-1)}{3N} \cdot \frac{E_b}{N_o}}$$

(1)

式中, E_b/N_0 为单路信号信噪比, E_b/N_{0j} 为恶化后信噪比, K 为多址路数, N 为扩频增益。

如表 1 所示,随着扩频增益降低,路数增加,信噪比恶化非常严重。

表 1 多路信噪比恶化
Table 1 Multi-channel SNR deterioration

调制方式	目标数	编码率	扩频码率/(Mchip · s ⁻¹)	编码前数据速率/(kb · s ⁻¹)	扩频增益/dB	(E_b/N_o)/dB	(E_b/N_{oj})/dB
BPSK	12	1/2	3.069	19	19.1	5.10	4
			5.115	32	19.0	5.10	4
			9.600	60	19.0	5.10	4
			10.23	60	19.3	5.03	4
	5	1/2	10.23	512	10.0	13.00	5

如果不采取抑制干扰的处理方法,MAI 将导致较高的信噪比恶化。按照任务需求,我们进行仿真分析的条件如下:

- (1)调制方式:BPSK;
- (2)信道编码:无;
- (3)信息速率:1 kb/s、10 kb/s、50 kb/s;
- (4)用户数量分别选取 1 个、4 个、8 个、12 个用户目标;
- (5)选用的扩频码之间近似满足如下的相关关系:

$$\int_0^T C_i(t) C_j(t) dt = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$$

(2)

式中, $C_i(t)C_j(t)$ 为各用户目标扩频码序列。

仿真结果如图 1 ~ 4 所示。从仿真结果可以看出,当信息速率为 1 kb/s 时,每个数据符号内有整数周期个扩频码序列,可以满足式(2)的条件,因此 12

个用户带来的多址干扰影响很小,其接收性能与单用户相当;而当信息速率提高为 10 kb/s 或 50 kb/s 时,每个数据符号内不是整数周期个扩频码序列,不满足式(2)的条件,因此 12 个用户会带来严重的多址干扰问题。

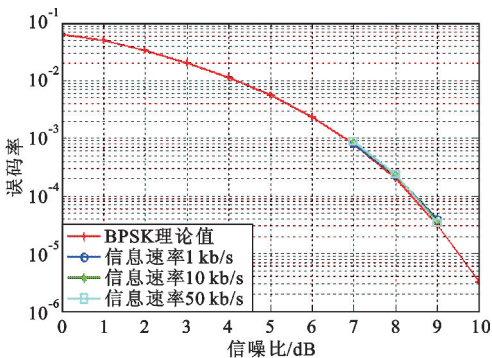


图 1 未采取干扰抑制时单用户不同速率接收性能
Fig. 1 user performance of different data rate without interference suppression

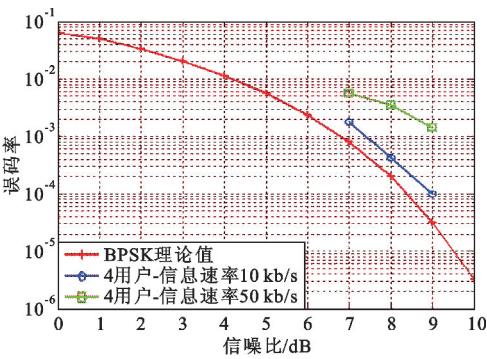


图 2 未采取干扰抑制时 4 个用户不同速率接收性能
Fig. 2 4 users performance of different data rate without interference suppression

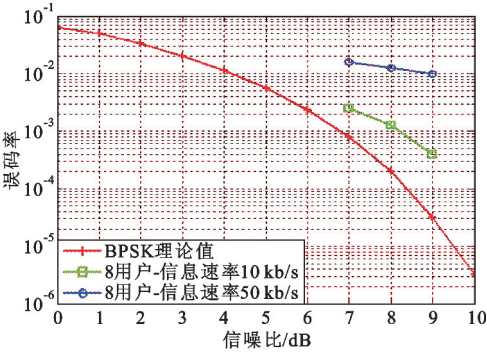


图 3 未采取干扰抑制时 8 个用户不同速率接收性能
Fig. 3 8 users performance of different data rate without interference suppression

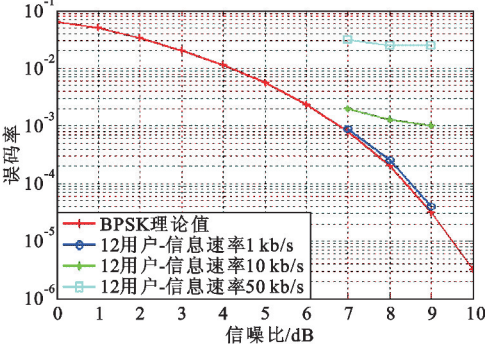


图 4 未采取干扰抑制时 12 个用户不同速率接收性能
Fig. 4 12 users performance of different data rate without interference suppression

综上所述,可得出如下结论:

- (1) 单用户时,接收性能与数据速率无关,如图 1 所示;
- (2) 用户数的增多或数据速率的提高均会导致接收性能的下降,如图 2~4 所示;
- (3) 当信息速率与扩频码片速率满足每个数据符号周期内有整数周期个扩频码序列的条件时,多用户比单用户性能会有轻微的下降,否则多址干扰严重。

3 TDRSS 系统码分多址干扰抑制方案设计

3.1 中继卫星系统与移动通信码分多址系统技术差别

(1) 扩频码型及信息速率选择

移动通信码分多址系统选取的扩频码是码长较短、具有严格自相关特性的 OVFSF 码,能够保证码分多址系统的最优性。TDRSS 因测控通信需要,选择的扩频码不能保证信息速率和扩频码速率(及周期)的整数倍关系。因此,此码分多址通信系统不是最优的。

(2) 接收端扩频码正交性同步控制

移动通信码分多址系统为保证收端的扩频码在相位上正交,需要对接收信号做时间上的同步处理,而 TDRSS 的多路用户终端信号的到达时间相互独立,系统没有同步的保证,因此无法满足扩频码的正交性。

(3) 码分多址系统远近效应控制

移动通信码分多址系统均具有用户终端的功率控制手段以保证到达接收端的各路信号功率相差足够小(通常控制在 1 dB 以内),TDRSS 没有对用户终端的功率控制手段。

根据上述描述,TDRSS 不是一个最优的码分多址通信系统,将产生较大的干扰,不能直接利用成熟的多用户检测技术,需要针对此系统的特点设计相应的多用户检测及多址干扰抑制方案。

3.2 减性多级迭代对消方案

本文提出一种减性多级迭代对消方案,算法设计中拟采用再生相减对消算法完成多用户检测并对码分多址干扰(MAI)做抑制处理。

此方案中的每路接收机需要在干扰对消之前完成 PN 码、载波的捕获跟踪,并能提取出位同步时钟。基于上述条件,完成对该路信号的重新生成之后,送其余 11 路接收机进行延时消除。当所有路信号均完成信号再生之后,通过延时相消即可完成对码分多址干扰信号的消除^[3-4],如图 5 所示。

对于多个用户直接序列扩频系统假设第 i 个用户的扩频码为 $C_i(t)$,传输信息为 $x_i(t)$,接收端收到的信号可表示为^[5-7]

$$r(t) = \sum_{i=1}^n A_i C_i(t - \tau_i) x_i(t - \tau_i) + n(t) \quad (3)$$

式中, A_i 为接收到第 i 个用户的幅度大小, τ_i 表示不同用户到达接收机的时间, $n(t)$ 为加性高斯白噪声。

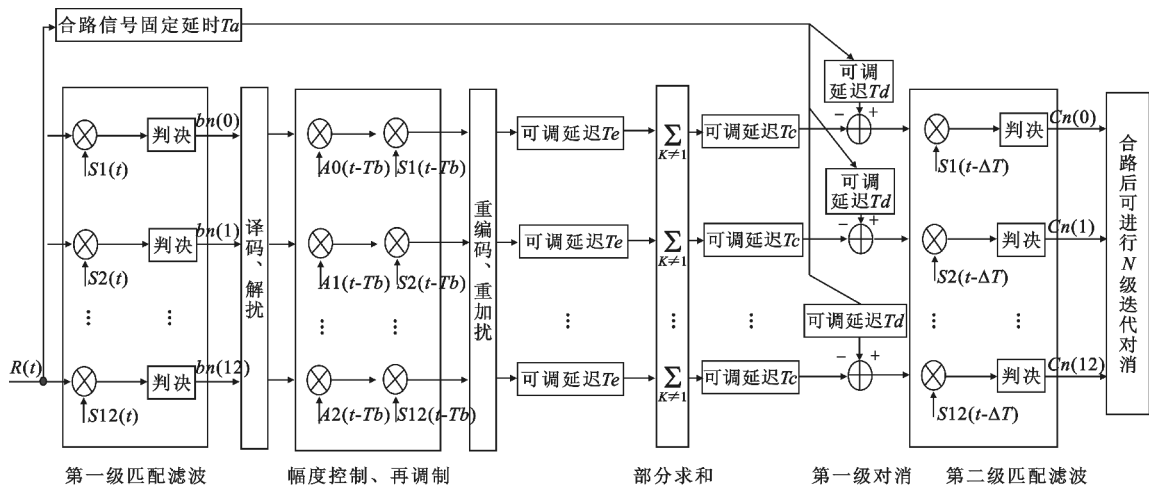


图5 码分多址干扰消除原理框图
Fig. 5 Block diagram of MAI cancellation

在下述应用场景中,采用多级迭代对消后,可以较好地抑制多址干扰。

- (1) 用户数量 ≤ 12 ;
- (2) 各路信号功率差别不大于 6 dB,即满足 $\{20\lg[\max(A_i)] - 20\lg[\min(A_i)]\} \leq 6\text{ dB}$;
- (4) (3) 各路信号的到达时间 τ_i 为在当前仿真时间内均匀分布的随机变量。

在此应用场景下进行仿真分析,结果如图 6~9 所示。

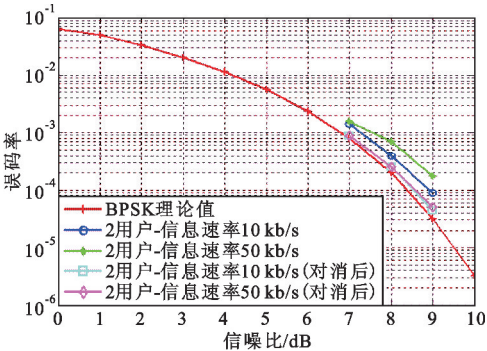


图6 2 个用户不同速率接收性能对比
Fig. 6 2 users performance of different data rate

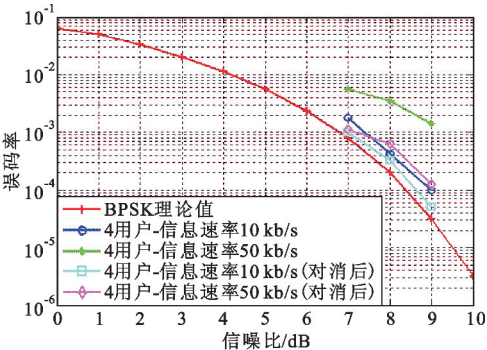


图7 4 个用户不同速率接收性能对比
Fig. 7 4 users performance of different data rate

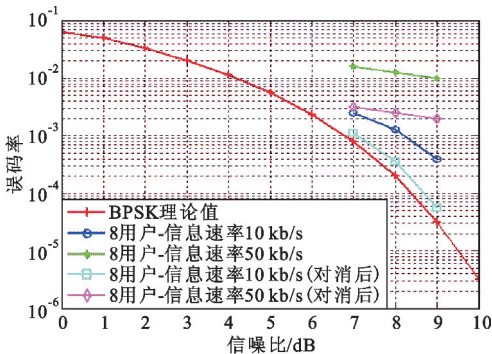


图8 8 个用户不同速率接收性能对比
Fig. 8 8 users performance of different data rate

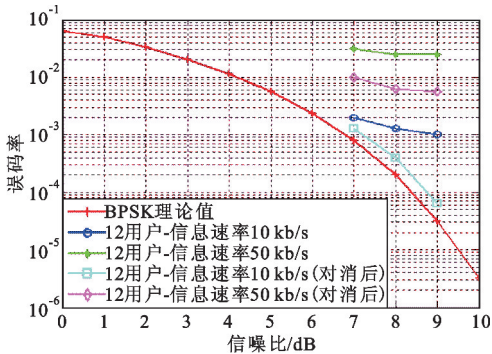


图9 12 个用户不同速率接收性能对比
Fig. 9 12 users performance of different data rate

根据仿真结果可得到如下结论:

- (1) 使用多级迭代对消方法可以在数据速率较低或用户数较少时得到与单用户时较为接近的接收性能;
- (2) 可以通过增加迭代级数获得更好的误码率性能;

(3)当数据速率较高同时用户数量也较多时,多级迭代对消方法会由于干扰不能完全抵消而产生错误平台(无噪声影响时也不能解调正确);

(4)采用适当的信道编码方式可以获得更好的误码率性能。

3.3 对消信号延时处理

在本系统中采用了 LDPC 编译码,由于编译码存在整帧的延时^[8],因此对消的延时处理需要选择合适的储存容量。下面按照存储容量最大需求设计信号延时存储器。

根据目前 TDRSS 中应用的 LDPC 编译码情况,LDPC 编译码参数如下时,数据帧周期最长:

- (1)LDPC 编码编码率: $R=1/2$;
- (2)LDPC 编码码长: $N=8192\text{ b}$;
- (3)LDPC 编码信息序列长度: $K=4096\text{ b}$;
- (4)帧同步字长度: $ASM=128\text{ b}$ 。

根据式(1),编码前速率最低19 kb/s时需要干扰对消,考虑编码率,则编码后最低38 kb/s需要干扰对消,帧周期计算可得

$$T=(1/38000)\times(8192+128)=0.219\text{ s}=219\text{ ms}。$$

(5)

因此,可以按最大延时220 ms考虑延时存储器。

如果 A/D 采样时钟为110 MHz,则220 ms时间采样点数为

$$0.22\times110\times106=24\ 200\ 000,$$

(6)

可得到存储器深度至少为25 Mb,考虑 12 位 A/D 采样,图 5 中各级存储容量为

- (1) Ta 存储器:12×25 Mb;
- (2) Te 与 Ta 近似相等:12×25 Mb;
- (3) Tb 、 Tc 、 Td 可以通过各通道相互对消后的积分值进行自动测量。

4 硬件实现及抑制效果分析

4.1 硬件设计

在硬件方案设计中,拟采用 FPGA+DSP 的硬件平台实现。在设备中我们选择了美国 Altera 公司生产的 Stratix 系列 FPGA 和美国 TI 公司生产的 C6000 系列 DSP 作为主要数字信号处理芯片。图 10 为平台硬件板卡实物图,图 11 为 CPCI 工控机结构示意图。

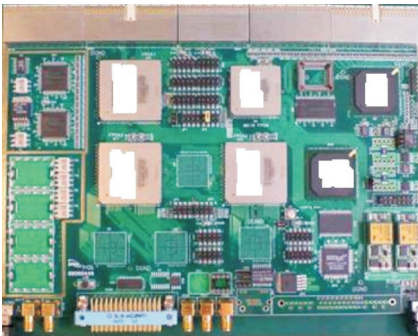


图 10 接收处理板实物图
Fig. 10 The board of receiver



图 11 CPCI 平台外观图
Fig. 11 Appearance of CPCI computer

该板卡可实现下行两路信号同时接收,在 CPCI 总线结构工控机中共用 6 块板卡实现 12 通道的接收,限于硬件资源的限制,在设备的应用中仅采取了一级对消。

4.2 验证测试结果

分别测试两目标条件下不同编码方式、不同信息速率的对消结果,如表 2~4 所示。

表 2 测试条件为:信道编码方式为不编码,信息速率512 kb/s,扩频码速率9.6 MHz。

表 2 不编码两目标干扰对消测试结果

Table 2 Interference suppression between 2 channels without channel coding

调制方式	干扰	误码率	
		不对消	对消
BPSK	通道 1	4.2×10^{-4}	2.0×10^{-5}
	通道 2	3.7×10^{-4}	2.5×10^{-4}
QPSK	通道 1	1.2×10^{-4}	9.2×10^{-6}
	通道 2	9.7×10^{-5}	1.3×10^{-5}

从表 2 测试结果可以看出,在不编码的条件下采用对消后可将误码率提高一个数量级。

表 3 测试条件为:信道编码方式为 2/3 LDPC 编码,信息速率512 kb/s,扩频码速率9.6 MHz。表 4

的测试条件为：信道编码方式为 2/3LDPC 编码,信息速率87.5 kb/s,扩频码速率9.6 MHz。

表 3 2/3 LDPC 编码条件下两目标干扰对消测试结果 (512 kb/s)

调制方式		干扰		误码率	
		不对消	对消	不对消	对消
BPSK	通道 1	7×10 ⁻⁶	0		
	通道 2	2×10 ⁻⁵	0		
QPSK	通道 1	4×10 ⁻⁵	0		
	通道 2	2×10 ⁻⁵	0		

表 4 2/3 LDPC 编码条件下两目标干扰对消测试结果 (87.5 kb/s)

调制方式		干扰		误码率	
		不对消	对消	不对消	对消
BPSK	通道 1	1.3×10 ⁻⁵	0		
	通道 2	1.5×10 ⁻⁵	0		
QPSK	通道 1	1.8×10 ⁻⁴	5.3×10 ⁻⁷		
	通道 2	1.3×10 ⁻⁴	7.1×10 ⁻⁷		

从表 3 和表 4 的测试结果可以看出,LDPC 编码条件下在传输最高512 kb/s信息速率时可基本消除两路信号 MAI 带来的多址干扰。

5 结束语

本文以 CDMA 移动通信系统并行干扰对消算法的基本思想为基础,结合扩频测控通信系统信号特点,针对中继卫星系统特点完成多目标扩频系统码分多址干扰抑制算法设计,并在现有终端硬件平台上完成算法实现。该方法是对码分多址系统多用户检测的补充,可以解决非最优 CDMA 系统的多用户检测和码分多址干扰抑制问题,且易于工程实现。随着技术发展,可以考虑配合用户终端进行功率控制,通过减小远近效应进一步抑制多址干扰。

参考文献：

[1] 保骏. TDRSS 返向多模式数传接收机设计[J]. 电讯技术,2011,51(3):22-26.
BAO Jun. Design of Multi-mode Data Transmission and Range Receiver [J]. Telecommunication Engineering, 2011,51(3):22-26. (in Chinese)

[2] 李井源. 卫星 CDMA 通信系统多用户检测与信干比估计算法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2006.
LI Jingyuan. Study of the Multiuser Detection and Signal

to Interference Ratio Estimation in Satellite CDMA system [D]. Changsha:National University of Defense Technology,2006. (in Chinese)

[3] 杨和桂. CDMA 系统中的多用户检测技术[D]. 南京:南京理工大学,2003:13-15.
YANG Hegui. MUD in the CDMA system[D]. Nanjing : Nanjing University of Science and Technology,2003:13-15. (in Chinese)

[4] 潘陈红. CDMA 系统中并行干扰抵消多用户检测算法的性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007:16-18.
PAN Chenhong. Performance Analysis of the PIC Multi-user Detection Algorithm for CDMA System[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2007:16-18. (in Chinese)

[5] 吕殿基. 用于 WCDMA 上行系统的并行干扰对消算法[J]. 通信技术,2009(7):126.
LYU Dianji. Applications of Parallel Interference Cancellation in WCDMA Uplinks[J]. Communications Technology,2009(7):126. (in Chinese)

[6] 吴志刚,龚耀寰. 基于 MMSE 横式滤波器和 PIC 联合的 MUD 算法[J]. 电讯技术,2004,44(4):32-33.
WU Zhigang,GONG Yaohuan. Multiuser Detection Algorithm Based on the Joint of MMSE Horizontal Filter and Parallel Interference Cancellation[J]. Telecommunication Engineering,2004,44(4):32-33. (in Chinese)

[7] Yang W B,Kamran S P. A Low Complexity Interference Cancellation Technique for Multi-User DS-CDMA Communications[C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town,South Africa:IEEE,2010:1-5.

[8] Jeewani K,Letzepis N,Grant A. Multi-User Decoder Assisted Code-Acquisition in CDMA Systems[C]// Proceedings of 2011 Australian Communications Theory Workshop (AusCTW). Melbourne,VIC:IEEE,2011:83-88.

作者简介：



保 骏(1977—),男,四川广元人,分别于 2000 年和 2010 年获电子科技大学学士学位和硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航天测控信号处理;

BAO Jun was born in Guangyuan,Sichuan Province,in 1977. He received the B. S. degree and the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2000 and 2010, respectively. He is now a senior engineer. His research concerns aerospace TT&C signal processing.

Email:tbaojun@139.com

汪远玲(1964—),女,四川人,研究员,主要研究方向为航天测控信号处理。

WANG Yuanling was born in Sichuan Province, in 1964. She is now a senior engineer of professor. Her research concerns aerospace TT&C signal processing.