

# 深空通信网络码间干扰多尺度时序抑制算法

蒙倩颜, 闫立誉, 覃 琴, 张 钰

(桂林电子科技大学 电子信息学院, 北海 536000)

**摘要:** 为优化深空通信质量, 提出了深空通信网络码间干扰多尺度时序抑制算法。首先, 根据深空通信结构, 明确了深空通信过程中, 通信信号在通信信道中的传输模式, 进而建立了深空通信网络信道模型。利用 FFT 算法对深空通信网络信道内的通信信号展开多尺度分析, 并将传输信号从时域变换至频域; 引入门限值算法, 通过信号频域内幅值的遍历, 实现码间干扰频点的判定。结合盲均衡算法与最小均方算法, 构建盲均衡器, 通过对通信信号自身序列的均衡处理, 实现深空通信网络的码间干扰多尺度时序抑制。实验表明: 本文方法能在保证接收端信号接收质量的同时, 减少深空通信网络的码间干扰, 为深空通信数据的有效传输提供重要保障。

**关键词:** FFT 算法; 门限值算法; 盲均衡算法; 最小均方算法; 盲均衡器

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3399-07

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231304

## Multi-scale temporal suppression algorithm for inter code interference in deep space communication networks

MENG Qian-yan, YAN Li-yu\*, QIN Qin, ZHANG Yu

(Academy of Electronic Information, Guilin University of Electronic Technology, Beihai 536000, China)

**Abstract:** In order to optimize the quality of deep space communication, a multi-scale temporal suppression algorithm for inter code interference in deep space communication networks is proposed. The proposed method first clarifies the transmission mode of communication signals in the communication channel during the deep space communication process based on the deep space communication structure, and then establishes a deep space communication network channel model. Utilize FFT algorithm to conduct multi-scale analysis of communication signals in deep space communication network channels, and transform the transmission signals from time domain to frequency domain; Introducing a threshold algorithm to determine the frequency of inter symbol interference by traversing the amplitude of the signal in the frequency domain. Combining blind equalization algorithm with minimum mean square algorithm, a blind equalizer is constructed to achieve multi-scale temporal suppression of inter symbol interference in deep space

**收稿日期:** 2023-11-27.

**基金项目:** 电子信息学院《通信系统课程群》建设项目(JGKJ202340); 广西创新驱动发展专项项目(AA19254016); 广西大数据发展局项目(桂数发[2022]20).

**作者简介:** 蒙倩颜(1988-), 女, 高级工程师. 研究方向: 信息与通信工程, 数字图像处理, 模式识别及算法.

E-mail: mmmqy963@126.com

**通信作者:** 闫立誉(1988-), 男, 高级工程师. 研究方向: 信息安全, 软件工程. E-mail: yanliyu\_jsj@163.com

communication networks by balancing the communication signal's own sequence. The experiment shows that the proposed method can ensure the quality of signal reception at the receiving end while reducing inter symbol interference in deep space communication networks, providing an important guarantee for the effective transmission of deep space communication data.

**Key words:** FFT algorithm; threshold value algorithm; blind equalization algorithm; minimum mean square algorithm; blind equalizer

### 0 引言

随着人类文明的发展,对世界的探索不再局限于地球,宇宙探索成为近年高速发展的领域之一。宇宙探索的对象为太阳系、行星、星云等天体的运行及演化情况,进而在了解地球及人类起源的同时,寻找其他行星上的可利用资源及可能存在的生命体。美国在 1958 年成立了 NASA 航空航天局,负责行星探测仪的发送与宇宙空间的探测及搜索。俄罗斯、日本等其他国家为了在竞争日益激烈的太空探索进程中占据有利条件,对于深空探索的技术研究投入力度不断加大,由此可见深空探索的重要战略意义。在深空探测过程中,探测飞行器需要经过长期的飞行才能获取少量的有用信息,当飞行器由于行星引力、障碍物阻挠、设备故障等原因不得不改变其运行轨迹时,地面的探测器轨迹规划及指令传输就显得格外重要<sup>[1]</sup>;再加上飞行器采集信息的稳定回传对深空通信环境的依赖,深空通信网络的通信质量优化成为近年的热点研究项目。

穆巍炜等<sup>[2]</sup>利用 MUSIC 算法实现传输信号的锁定,并结合 Capon 算法生成向信号的队形数字波束,并在信号接收端设置高增益波束的环形阵列集群分布指向。通过信号初始通道内的幅相一致性校准方法,达到接收端干扰抑制的目的。利用此方法对通信网络实施干扰抑制的过程中,导致接收端误比特率的增高,信号传输可靠性较低。

周菁菁等<sup>[3]</sup>基于深空通信期间大气对深空通信的干扰,引入对角化算法,并建立深空网络无光通信模型,实现深空通信过程中、大气中的湍流效应、大气散射等干扰项对深空网络的实际影响。结合贝叶斯理论,对深空网络信道的传输展开优化设计,基于贝叶斯理论实现深空通信网络内的码间抑制。此方法在抑制通信过程中码间干扰的同时,造成了接收端误码率的增加,降低了通信

质量。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出深空通信网络码间干扰多尺度时序抑制算法。

### 1 深空通信网络信道模型

在深空探测过程中,探测器按照规定路线实现深空数据采集后,通过深空网络实现数据到地面接收器的传输,并通过深空通信网络实现地面任务指令的反馈接收。深空网络通信结构如图 1 所示。

深空航天探测器与接收器之间的信号接收与发送是深空网络数据的主要传输途径,然而,由于地面在接收深空信号接收的同时,伴随信号频谱加宽、信号衰减现象的发生<sup>[4]</sup>,因此,可将深空通信网络信道视为一个具有衰落特性的高斯白噪声信道,并以此为基础,建立深空通信网络信道内信号传输模型。

将地面接收器的接收信号视为经  $N$  个 Doppler 频移<sup>[5]</sup>叠加得到的多径信号,设航天器采集信号的多径目数为  $n$ ,深空通信网络信道的衰落因子为  $b_n(u)$ ,数据传输过程的路径损耗为  $o_n(u)$ ,此时地面

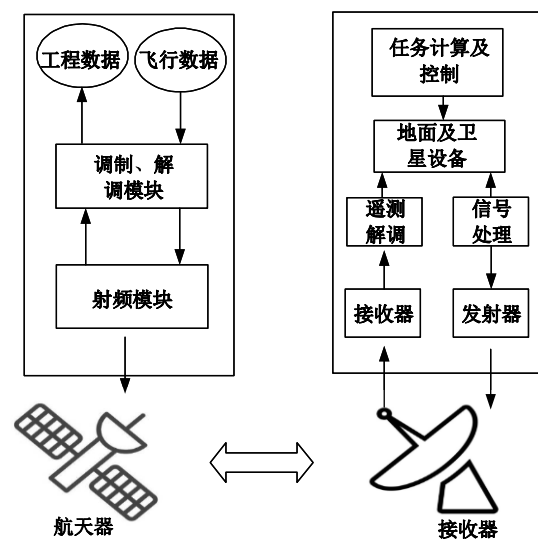


图 1 深空网络通信结构

Fig. 1 Communication structure of deep space network

接收器的接收信号  $s(u)$  可通过式(1)计算:

$$s(u) = \sum_{n=0}^N b_n(u) o_n(u) [u - v_n(u)] e^{f_c + f_{E_n}(u)[u - v_n(u)]} \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为载波频率;  $f_{E_n}(u)$  为 Doppler 频移;  $e$  为自然常数;  $v_n(u)$  表示信号  $u$  的同向分量。

地面接收器接收信号的复基带等效信号  $z(u)$  可通过式(2)表示:

$$z(u) = \sum_{n=0}^N \chi(u) e^{-\gamma(u)} [u - v_n(u)] \quad (2)$$

式中:  $\chi(u)$  为信号传输过程中的相位转化增益;  $\gamma(u)$  为信号  $u$  的正交分量。

基于上述深空通信网络的信号传输原理,可推导出地面接收器内的信号噪声功率比  $D/N$ , 通过式(3)表示:

$$(D/N) = \frac{Q_v K_v z(u)}{4\pi k S^2 C_n L_{all}} = \frac{Q_v K_v K_w s(u) \mu^2}{(4\pi)^2 k S^2 C_n L_{all}} \quad (3)$$

式中:  $Q_v$ 、 $K_v$  分别表示发射器的输出功率与天线输出增益;  $K_w$  表示天线接收增益;  $\mu$  为信号波长;  $S$  为信号传输距离;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $C_n$  表示接收带宽;  $L_{all}$  为深空通信网络的传输总消耗量。  $(D/N)$  的计算过程也可视为深空通信网络下行链路的基本方程推导过程。

以上方法可建立考虑深空航天器信号传输过程中衰落特性的深空通信网络信道模型。

## 2 码间干扰抑制

### 2.1 码间干扰识别

利用 FFT 算法对深空通信网络信道内的传输信号展开多尺度分析,并将其转换至频域。考虑深空通信过程中,地面接收到的多径信号 Doppler 频率普遍较大,对深空信号的稳定传输造成影响。现以多径频率斜升信号为高数值 Doppler 频率信号的主要成分,对深空通信网络的传输信号展开多尺度分析。设  $t$  为随机信号的高 Doppler 频率值,构建如式(4)所示高数值 Doppler 频率信号模型:

$$y(t) = B \sin[2\pi(g_0 + 2^{-1} g_e' u)u + \gamma(u) + \gamma_0] + p(u) \quad (4)$$

式中:  $B$  为传输信号幅度;  $\gamma_0$  为深空通信多径信号初始相位;  $\gamma(u)$  为信号  $t$  的相位调制表示;  $g_0$  为信号初始频率;  $p(u)$  为深空通信信号中的高斯白噪声;  $g_e'$  表示传输信号的 Doppler 变化率。

利用固定分析带宽对 Doppler 频率值较大的深空通多径信号斜升信号展开 FFT 变换,可发现单正弦信号的能量多为集中表现,且伴随较高增益,将这种现象称为平台效应。设深空通信信号的原始时域能量与 FFT 变换后的频域能量值相等,以  $Y$  频段的任意信号  $i$  为例,此时可通过式(5)实现  $y(i)$  的 FFT 变换:

$$F[y(i)]_f = \sum_{o=0}^{N-1} y(o) e^{-2\pi \frac{K}{N} o}, f=1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

式中:  $K$  表示频域内的离散点个数;  $N$  为 FFT 分析点个数;  $e$  为复变函数<sup>[6]</sup>。

经过  $T$  时间间隔之后,信号  $i$  的频域能量将被分散化处理,设分散后的能量归属区间为  $[g_0, g_0 + (N-1)g_e' T]$ , 区间内的能量分布近似一个平台。设  $|Y_D|^2$  为频率斜升信号在  $[g_0, g_0 + (N-1)g_e' T]$  区间内的能量常数,则此时深空通信信道内多径斜升信号的 FFT 变换满足式(6)的条件:

$$NB^2 = 2 \left\{ 1 + [N(N-1)g_e'] |Y_D|^2 \cdot N^{-1} \right. \\ \left. 2 \left\{ 1 + [g_e' \cdot C_{RBW}^2] |Y_D|^2 \cdot N^{-1} \right\} \right\} \quad (6)$$

式中:  $\{\cdot\}$  表示取整运算;  $B$  为斜升信号的传输幅值;  $C_{RBW}$  为 FFT 变换过程中的分析带宽。

基于式(6)可实现能量常数  $|Y_D|^2$  的反向推导,推导过程如式(7)所示:

$$|Y_D|^2 = B^2 N^2 \times 2 \left\{ 1 + g_e' \frac{1}{C_{RBW}^2} \right\} \quad (7)$$

通过以上计算发现,对深空通信网络信道内的传输信号实施 FFT 转换的过程中,地面接收信号的频率变化与分析带宽及 FFT 分析点个数呈反比,为减少 FFT 变换过程中于平台效应造成的深空高动态微弱信号的频域转换遗漏,在 FFT 转换过程中需要将 FFT 信号频域变换中涉及的能量分布限制 3 个点范围内,并在 FFT 的可接收频率上限内,对深空网络信号展开频域变换,FFT 的可接收上限  $g_{e_{max}}'$  可根据式(8)计算:

$$\left\{ 1 + \frac{g_{e_{max}}'}{C_{RBW}^2} \right\}^{-1} = \frac{NB^2}{2.5} (B^2 N^2)^{-1} \quad (8)$$

设深空通信信号在频域上的信号均值为  $F$ , 标准差为  $\delta$ , 此时可利用式(9)实现用于深空通信网络干扰信号判断的门限值  $TH$  的计算:

$$TH = F + \delta \cdot v \quad (9)$$

式中:  $v$  为门限参数。

利用式(9)对完成FFT频域变换后的频点展开遍历,若该点幅值小于TH门限值,则判定该频点对应的深空通信信号为正常传输信号;若该点幅值大于TH门限值,则判定该频点对应的深空通信信号在FFT频域上发生线性失真,即此时深空通信网络的信号传输受到码间干扰。

### 2.2 码间干扰抑制

在判定深空通信网络受到码间干扰前提下,引入盲均衡算法<sup>[7]</sup>,将深空通信过程中的传输信号输入至盲均衡器中,通过对信号自身序列的均衡处理,实现深空通信网络的码间干扰抑制。盲均衡基带模型如图2所示,其中: $b(l)$ 为深空通信过程中的信源信号序列, $b(l)$ 经过深空通信网络的传输信道,生成信道冲击响应<sup>[8]</sup>序列 $i(l)$ , $y(l)$ 为信源信号经过信道传输后生成的输出序列,此阶段可能造成高斯白噪声 $x(l)$ 的混入<sup>[9]</sup>,信源信号以 $z(l)$ 序列形式输入盲均衡器中,经过盲均衡器的分序列均衡处理,以 $a(l)$ 序列形式输出, $g(l)$ 为盲均衡器内的核心卷积权向量。以上深空通信信号序列在盲均衡基带内的传输关系表达式为:

$$\begin{cases} y(l) = b(l) \cdot i(l) \\ z(l) = y(l) + x(l) \\ a(l) = g(l) \cdot z(l) \end{cases} \quad (10)$$

在不考虑噪声影响的情况下,可推导出盲均衡器的输出信号序列, $a(l)$ 计算方法如式(11)所示:

$$a(l) = i(l)g(l)b(l) \quad (11)$$

根据FFT频域上线性失真信号的实际信号序列与期望序列差值,引入最小均方算法<sup>[10]</sup>,对

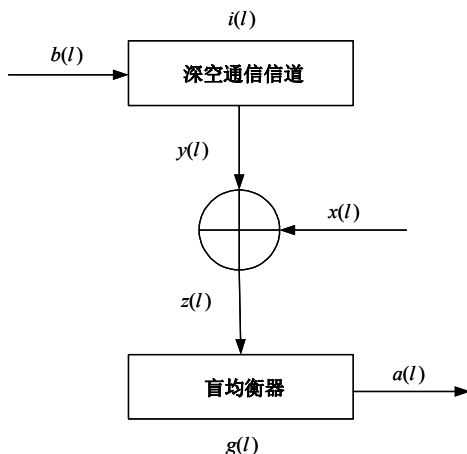


图2 盲均衡基带模型

Fig. 2 Blind equalization baseband model

盲均衡器的权向量 $g(l)$ 实施更新,迫使盲均衡器的输出信号序列最大化逼近于发送序列,进而达到深空通信网络的码间干扰抑制目的。

设随机信源信号的目标序列为 $b(j)$ ,此时可通过式(12)实现盲均衡器的内部误差函数 $h(j)$ 的计算:

$$h(j) = b(j) - z(j)g^T(j) \quad (12)$$

根据MMSE准则<sup>[11]</sup>可知,盲均衡器的输出信号与输出信号之间的均方误差可被等效为盲均衡器额定代价函数,代价函数 $K(j)$ 的计算过程如式(13)所示:

$$K(j) = E\left\{ [b(j) - z(j)g^T(j)]^2 \right\} = E\left\{ [b(j)]^2 - 2g^T(j)E[b(j)z^T(j)] + g^T(j)E[z(j)z^T(j)] \right\} \quad (13)$$

式中: $E\{|\cdot|\}$ 表示期望值计算。

结合MMSE准则,可推导出盲均衡器点的权向量公式更新方法如式(14)所示:

$$g(j+1) = g(j) + 2\omega e(j)z^*(j) \quad (14)$$

式中: $\omega$ 为迭代步长; $e$ 表示盲均衡算法的误差项; $*$ 表述共轭取值。

利用盲均衡器点的权向量公式更新结果对深空通信信号展开均衡处理,即可实现深空通信网络多径信号传输过程中码间干扰的多尺度时序抑制。

### 3 实验与分析

为验证本文方法的可行性,先选取300个接收元构成的深空通信网络为信号传输平台,在通信载波频率为5 kHz的前提下,分别利用本文方法、文献[2]方法以及文献[3]方法对初始信号展开码间干扰抑制处理,完成干扰抑制处理后,根据不同方法的干扰处理结果,绘制传输信号振幅图,通过不同方法的振幅对比,实现3种方法的抑制效果对比,结果如图3、图4所示。

观察图3可发现,本文方法、文献[2]方法以及文献[3]方法对原始深空通信网络信号传输过程实施码间干扰抑制后,信号传输振幅得到了不同程度的降低,然而文献[2]方法与文献[3]方法的信号局部传输振幅没有得到很好的抑制。这是因为本文方法首先分析了深空通信网络的信号传输结构,明确了信号接收端与发出端的传输机制,根据深空通信网络内信号传输过程中的信道特

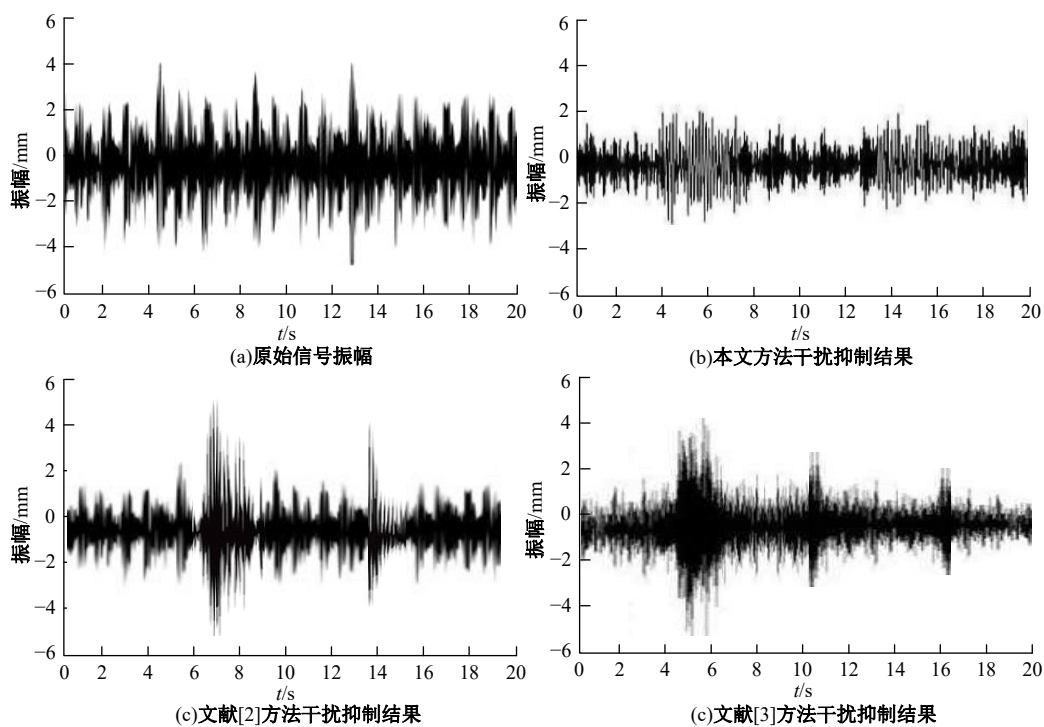


图 3 码间干扰抑制效果对比

Fig. 3 Comparison of inter code interference suppression effects

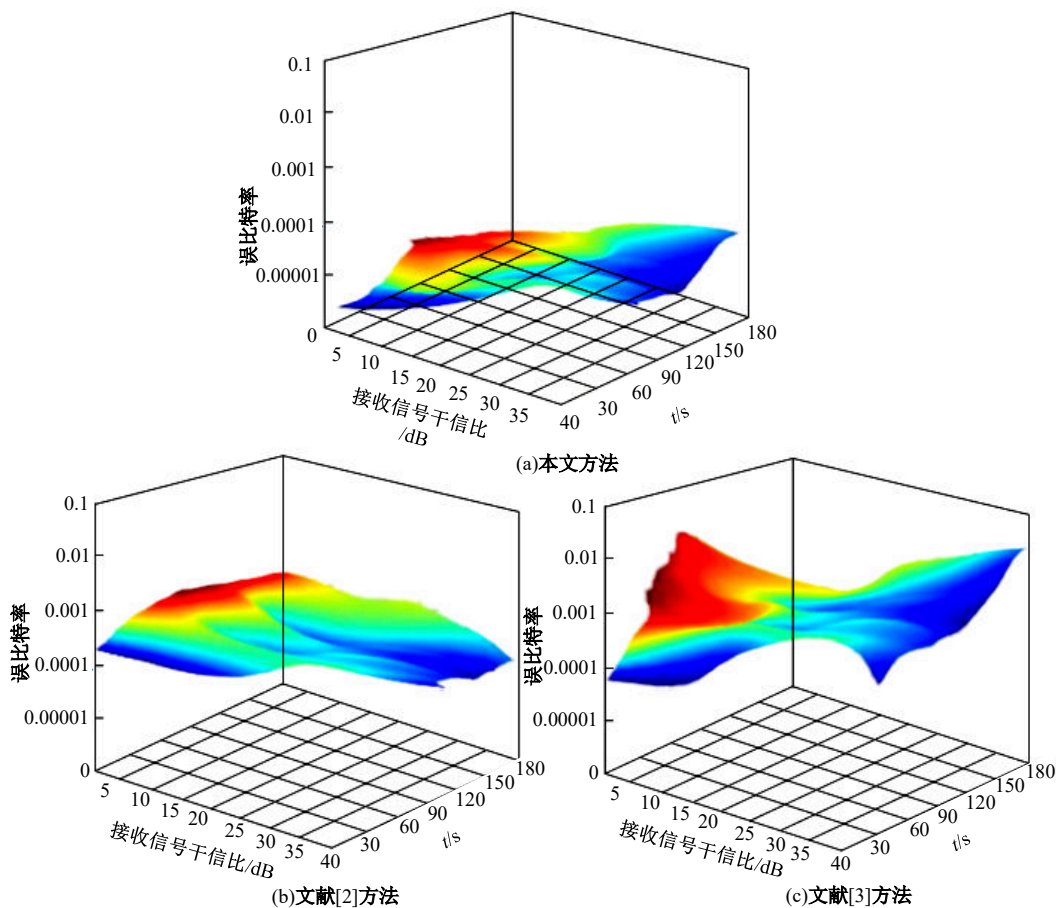


图 4 信号有效传输对比

Fig. 4 Comparison of effective signal transmission

性,制订了码间干扰点的抑制方法,实验证明所提方法码间干扰抑制效果明显。

为验证本文方法的可靠性,在深空通信过程中,令地面信号接收端的信干比逐渐升高,在此背景下,分别利用本文方法、文献[2]方法及文献[3]方法对深空传输信号展开码间干扰抑制,引入误比特率指标,评价地面接收端信号的有效接收概率,误比特率越低,则证明对应方法的数据有效传输概率越高,即该方法的可靠性就更高。

观察图4可发现,相较于文献[2]方法及文献[3]方法,利用本文方法对深空通信网络实施的码间干扰抑制,能在低误比特率的前提下实现通信信号的有效传输,这是因为所提方法利用FFT变换方法将深空网络中原始信号转换至频域并实施分析,在降低平台效应对FFT变换精度的影响之后,结合信号判断米恩限的制定,实现了深空通信网络信号传输过程中的码间干扰识别,为后续码间干扰抑制奠定了基础。

误码率是评价深空通信网络信息传输质量的重要指标之一,为了进一步验证本文方法的码间干扰抑制能力,分别利用本文方法、文献[2]方法及文献[3]方法对深空网络信号传输过程中的码间干扰实施抑制,在此基础上引入误码率评价指标,在通信信噪比不端正高的前提下,观察不同方法码间干扰抑制措施下的地面信号接收端误码率变化情况,具体分析结果如表1所示,可见,利用本文方法对深空通信网络展开码间干扰抑制后,信号在传输过程中被错传的概率低于文献[2]方法以及文献[3]方法,证明本文方法的码间干扰抑制效果优于[2]方法以及文献[3]方法。这是因为所提方法引入盲均衡算法从信号的自身序列为

表1 误码率变化情况

Table 1 Changes in bit error rate

通信信噪比/ dB	误码率/%		
	本文方法	文献[2]方法	文献[3]方法
2	$3 \times 10^{-1}$	$7 \times 10^{-1}$	$5 \times 10^{-1}$
4	$6 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-2}$	$9 \times 10^{-2}$
6	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^{-3}$
8	$3 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
10	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$
12	$7 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
14	$4 \times 10^{-7}$	$6 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-5}$
16	$5 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-5}$
18	$1 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$
20	$5 \times 10^{-9}$	$9 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-7}$

出发点,建立盲均衡器,通过盲均衡器内核心卷积核向量的更新,实现深空通信过程中的码间干扰抑制,确保了深空信号的传输质量。

## 4 结束语

在深空探索进程不断推进的背景下,深空通信过程中的码间干扰消除问题成为数据稳定有效传输的基本保障。本文方法基于深空通信信道模型的建立,分析了深空通信网络的整体架构,并结合FTT算法与盲均衡算法,实现了深空通信过程中的多尺度码间干扰抑制。后续可以结合网络拓扑动态变化的相关研究,进一步优化深空通信网络码间干扰的抑制效果。

## 参考文献:

- [1] 田百义,张焯,冯昊,等. 面向木星卫星交会任务的探测器飞行路径规划[J]. 宇航学报, 2022, 43(12): 1587-1596.  
Tian Bai-yi, Zhang He, Feng Hao, et al. Flight path planning for rendezvous mission of jovian probe with the jupiter's moons[J]. Journal of Astronautics, 2022, 43(12): 1587-1596.
- [2] 穆巍伟,何滨兵,齐尧,等. 基于环形阵列的地面无人装备集群通信干扰抑制[J]. 兵工学报, 2023, 44(5): 1414-1421.  
Mu Wei-wei, He Bin-bing, Qi Yao, et al. Interference suppression in ground unmanned equipment cluster communication based on circular array[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(5): 1414-1421.
- [3] 周菁菁,秦永,甘方成. 基于改进对角化算法的无线光通信码间干扰抑制方法[J]. 激光杂志, 2022, 43(11): 104-108.  
Zhou Jing-jing, Qin Yong, Gan Fang-cheng. Inter-code interference suppression method for wireless optical communication based on improved diagonalization algorithm[J]. Laser Journal, 2022, 43(11): 104-108.
- [4] 冯世杰. 高超声速目标尾迹对GNSS信号的衰减特性研究[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(1): 40-45.  
Feng Shi-jie. Study on attenuation characteristics of GNSS signal in hypersonic target wake[J]. Radar Science and Technology, 2023, 21(1): 40-45.
- [5] 孙凯,高大治,高德洋,等. 多普勒频移和干涉谱联合的水声目标运动参数估计[J]. 声学学报, 2023, 48(1): 50-59.  
Sun Kai, Gao Da-zhi, Gao De-yang, et al. Estimation of motion parameters of underwater acoustic tar-

- gets by combining Doppler shift and interference spectrum[J]. *Acta Acoustica*, 2023, 48(1): 50-59.
- [6] 杨森,戴武奎,王颖. 复变函数法计算圆形盾构隧道周边土体位移[J]. *辽宁工程技术大学学报:自然科学版*, 2021, 40(2): 141-147.
- Yang Miao, Dai Wu-kui, Wang Ying. Calculating settlement of soil around circular shield tunnel with complex variable[J]. *Journal of Liaoning University of Engineering and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 40(2): 141-147.
- [7] 潘子豪,谢琛,王桁,等. 面向物联网无人机通信的短突发CPM信号盲均衡算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2023, 45(6): 1847-1855.
- Pan Zi-hao, Xie Chen, Wang Heng, et al. Blind equalization algorithm of short burst CPM signal for UAV communication in internet of things[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(6): 1847-1855.
- [8] 李明,涂亚庆,万平,等. 频率无偏估计的有限冲激响应自适应陷波器方法研究[J]. *信号处理*, 2021, 37(4): 596-602.
- Li Ming, Tu Ya-qing, Wan Ping, et al. Unbiased frequency estimation method based on fir adaptive notch filter[J]. *Journal of Signal Processing*, 2021, 37(4): 596-602.
- [9] 刘迪,胡美. 高斯白噪声下非对称单稳态能量采集系统的随机响应分析[J]. *山西大学学报:自然科学版*, 2022, 45(4): 947-953.
- Liu Di, Hu Mei. Stochastic response analysis of asymmetric monostable energy harvesting system driven by gaussian white noise[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2022, 45(4): 947-953.
- [10] 张淦,王海彬,黄媛婷,等. 引信微弱信号降噪箕舌线最小均方误差变步长算法[J]. *探测与控制学报*, 2023, 45(2): 1-10.
- Zhang Gan, Wang Hai-bin, Huang Yuan-ting, et al. Versiera function LMS variable step size algorithm for radio fuze weak signals noise reduction[J]. *Journal of Detection & Control*, 2023, 45(2): 1-10.
- [11] 张焯,肖启阳. 电子通信多径信号强干扰滤波抑制仿真[J]. *计算机仿真*, 2023, 40(6): 245-249.
- Zhang Ye, Xiao Qi-yang. Simulation of strong interference filter suppression of multi-path signals in electronic communication[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(6): 245-249.