

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.02.005

直升机卫星通信中高动态低信噪比突发解调

龚险峰¹, 刘明洋¹, 惠腾飞^{1,2}

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100; 2. 西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室, 西安 710071)

摘要: 采用突发通信模式的低速直升机卫星通信链路同时存在周期性的旋翼遮挡和较大的多普勒动态, 且需要工作在低信噪比下, 这些特点对解调提出了很大挑战, 需要研究高性能、低复杂度的突发解调方法。本文基于分散导频帧结构提出一种译码辅助解调方法。首先进行频偏分区预补偿, 然后进行联合频率变化率估计的突发捕获, 最后根据译码软输出目标函数, 从多路译码输出中选择最优的一路作为最终结果。在给定的信道模型下, 与无遮挡高斯白噪声 (Additive white Gaussian noise, AWGN) 信道下的理论性能相比, 解调门限仅提高 1.5 dB。与缝隙通信方式的典型性能相比, 前向链路信噪比损失降低 1.5 dB, 反向链路信噪比损失增大 0.2 dB。

关键词: 卫星通信; 旋翼遮挡; 多普勒动态; 译码辅助解调; 缝隙通信

中图分类号: V19 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2022)02-0219-06

Burst Demodulation of High Dynamic and Low SNR Signals for Helicopter Satellite Communications

GONG Xianfeng¹, LIU Mingyang¹, HUI Tengfei^{1,2}

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For the low-speed helicopter satellite communication link with burst mode, there are periodic rotor blade blockage, large Doppler dynamics and low signal-to-noise ratio, which pose a huge challenge to demodulation. It is necessary to study the burst demodulation technology with high performance and low complexity. Based on the decentralized pilots frame structure, a code-aided demodulation method is proposed. First, different frequency offsets are pre-compensated by zones. Then, the burst acquisition of joint Doppler rate estimation is carried out. Finally, the best demodulation branch is selected according to the statistical characteristics of decoding soft output. The simulation results show that, under a given channel model, the demodulation threshold is only increased by 1.5 dB compared with the theoretical performance of unobstructed additive white Gaussian noise (AWGN) channel. Compared with the typical performance of slot transmission, the forward link loss is reduced by 1.5 dB and the return link loss is increased by 0.2 dB.

Key words: satellite communications; rotor blockage; Doppler dynamic; code-aided demodulation; slot transmission

直升机卫星通信中机载终端通过卫星与地面关口站或其他终端进行通信, 由于无需地面中继站进行中继转发, 因而能够在更广阔的区域内进行信息传输, 应用领域十分广泛。但是, 受限于平台空

间, 直升机上只能安装口径较小的天线, 终端通信能力较弱, 特别是 VHF/UHF 频段, 通信速率一般只能达到数千比特/秒。对于具有高机动特性的直升机, 随着飞行姿态的剧烈变化, 其通信信号具有

基金项目: 国家重点实验室稳定支持基金 (2020SSFNKLSMT-10)。

收稿日期: 2021-08-29; **修订日期:** 2022-03-22

通信作者: 龚险峰, 男, 高级工程师, E-mail: gongxf1982@163.com。

引用格式: 龚险峰, 刘明洋, 惠腾飞. 直升机卫星通信中高动态低信噪比突发解调[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 219-224. GONG Xianfeng, LIU Mingyang, HUI Tengfei. Burst demodulation of high dynamic and low SNR signals for helicopter satellite communications[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 219-224.

较大的多普勒动态,从而提高了低载波速率信号的解调难度。同时,直升机飞行过程中,通信链路会受到旋翼遮挡影响,造成接收信号周期性功率衰减,尽管可以通过低码率编码和信道交织进行纠错,但是信号衰落可能引起接收机同步失锁,导致性能急剧恶化。

为了克服旋翼遮挡问题,直升机宽带卫星通信多采用缝隙通信技术,通过非遮挡缝隙时间内传输的数据来恢复信息。具体而言,前向链路可采用组帧重发时间分集策略,反向链路可采用旋翼同步突发技术^[1-3]。2009年,美国ViaSat公司研制的直升机宽带卫通设备应用于黑鹰直升机^[1],前向链路采用两重时间分集传输方式,信道利用率达到50%;反向链路采用本地控制突发传输方式,信道利用率达到65%。2011年,清华大学为“神舟八号”飞船返回舱搜救任务研制的直升机卫通系统^[4]采用信道预测和可变速率编码技术,反向信道利用率超过75%。可以看出,缝隙通信降低了链路利用率,前向链路信噪比损失较大(按两重组帧重发,损失为3 dB),反向链路信噪比损失较小(按75%信道利用率,损失为1.3 dB)。但是,对于低速直升机卫星链路,由于同时存在旋翼遮挡和高多普勒动态,基于缝隙检测的短突发信号解调性能较差。因此,有必要寻找新的通信方法,进一步提高前向链路利用率和反向链路解调性能。

1 系统模型

1.1 直升机卫星通信链路特性

当直升机与卫星进行通信时,电磁波在旋翼附近产生衍射效应,对于较低的UHF和L频段,遮挡导致的信号衰落可能达到5~15 dB,而对于较高的Ku和Ka频段,该衰落则更加显著。遮挡特性与旋翼转速、载机与卫星的相对位置和姿态、载机桨叶宽度和数量、天线安装位置等诸多因素有关。由于影响因素众多,获取精确的链路特性并不容易,为了简化分析,可以采用简易直升机信道模型^[5]。

简易直升机信道模型可以由3个参数确定,分别为遮挡周期 T_c 、遮挡持续时长 T_b 、衰落深度 P_b ,如图1所示。其中,遮挡周期是旋转角频率与螺旋桨数量之积的倒数;遮挡持续时长取决于旋转角频率、天线与螺旋桨轴的距离以及螺旋桨叶片的宽度;衰落深度则与叶片的材质、宽度、通信频率等参数相关。本文将以此简易直升机信道模型为依据,对算法性能进行评估。

1.2 抗旋翼遮挡波形设计

对于突发通信,一般采用带前导头的物理层帧

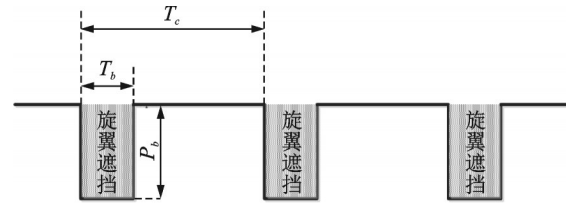


图1 简易直升机信道模型

Fig.1 Simplified helicopter channel model

结构,便于接收机进行突发捕获和快速参数同步。但是,当存在旋翼遮挡时,前导头可能处于深度衰落,因而集中导频帧结构存在明显不足。在正交频分复用通信系统中,通常采用在时域和频域分散导频的帧结构,用于跟踪时变的频域选择性信道响应。借鉴上述思路,为了对抗旋翼遮挡,采用分散导频帧结构辅助接收机同步。如图2所示,突发帧长为 L_F ,分成 N 段,每段长度为 L_D ,包含1个导频符号和 $(L_D - 1)$ 个数据符号,下文约定以 (L_F, L_D, N) 表示该帧结构所对应的相关参数。

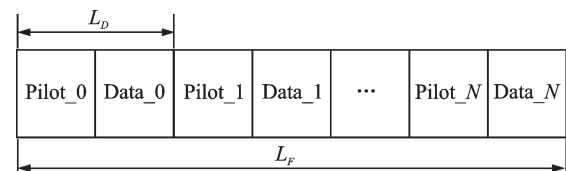


图2 分散导频帧结构

Fig.2 Decentralized pilots frame structure

在上述帧结构中,为了提高信道交织性能,突发帧长度一般取遮挡周期的2~3倍以上。导频间隔 L_D 对旋翼遮挡和多普勒动态的适应能力具有重要影响,增大 L_D 可以提高帧传输效率和频率估计分辨率,但会降低对旋翼遮挡衰落的适应能力,反之亦然。

1.3 解调架构

整个解调架构如图3所示,AD采样数据经过数字下变频和滤波后,进行数据缓存。在给定的最大频偏范围 $[-f_{max}, f_{max}]$ 内,以载波同步模块能够适应的最大频偏 $\pm f_{sub}$ 为间隔,将整个频偏范围等间隔划分为 H 个区间,每个区间的中心频率为 $f_n (n = 0, 1, \dots, H - 1)$,实际频偏落在其中某一个区间内。考虑到载波速率低,为了降低实现复杂度,可以对每个频率区间采用时分复用方式进行解调。首先,对缓存数据预补偿频偏 f_n ;然后,经过符号同步、突发捕获、载波同步、解信道交织以及Turbo译码等处理后,得到 H 路不同的译码输出软信息;最后,根据译码软输出目标函数,从 H 路译码输出中选择最优的一路作为最终输出结果。下文重点介绍突发捕获算法和译码输出选择算法。

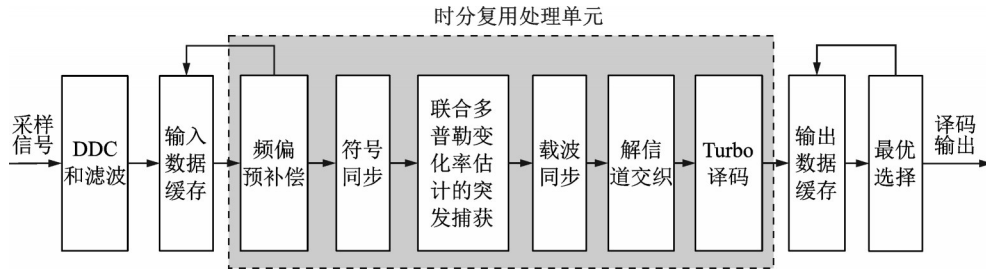


图3 突发解调总体架构

Fig.3 Overall architecture of burst demodulation

2 高动态低信噪比下的突发捕获

对于突发信号解调,突发捕获一般是后续其他参数估计和同步的基础。由于多个信道参数(如:频偏、频率变化率、突发起始等)处于未知状态,为了降低捕获难度,一般利用已知的前导头通过时域相关^[6]或者频域 FFT^[7]完成突发捕获。时域捕获方法实现复杂度低,但是对频偏的适应能力有限;频域捕获对频偏适应能力较强,但实现复杂度较高。对于分散导频结构,由于导频符号间隔为 L_D ,若采用时域相关捕获,等效于对频偏的适应能力降低了 L_D 倍,因而更适合采用基于 FFT 变换的频域捕获方案。

2.1 突发信号的频域捕获

经过高斯白噪声信道传输的单载波突发信号,在通过匹配滤波器和理想符号同步后,等效基带信号可以表示为^[8]

$$r(n) = s(n) \exp \left[j \left(2\pi \left(f_d n + 0.5 \alpha n^2 \right) + \phi \right) \right] + w(n) \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为发端发送的调制信号; f_d 为按符号速率 R_s 归一化的载波频偏; α 为按符号速率平方 R_s^2 归一化的频率变化率; ϕ 为初始相偏; $w(n)$ 为均值为 0、方差为 σ_w^2 的复高斯随机噪声。

假定分散导频符号为 $p(n)$, 基于 FFT 变换的频域捕获算法描述如下(算法 1):

(1) 对于收到的 $N \cdot L_D$ 个基带信号符号, 利用本地导频符号进行数据辅助去调制, 得到

$$z(n) = r(nL_D) \cdot p^*(n) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

(2) 在 $z(n)$ 后补 0, 得到

$$\hat{z}(n) = \begin{cases} z(n) & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & n = N, N+1, \dots, N_1-1 \end{cases} \quad (3)$$

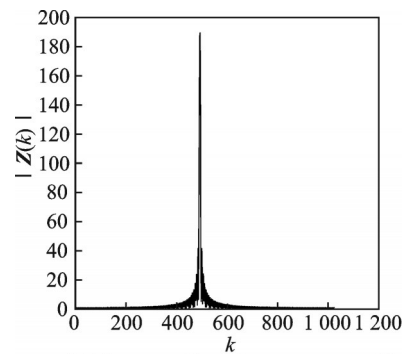
(3) 对 $\hat{z}(n)$ 进行 N_1 点的 FFT 变换得到 $Z(k)$, 然后计算频谱幅度峰值和均值, 得到判决量

$$J = \frac{\max(|Z(k)|)}{\text{mean}(|Z(k)|)} \quad (4)$$

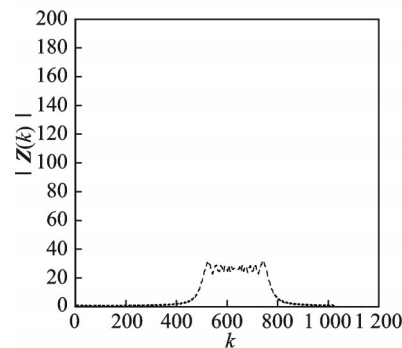
(4) 对于给定的捕获门限 J_{th} , 如果 $J \geq J_{th}$, 则认

为捕获到突发信号; 否则, 收到下一个符号后, 将接收数据向后移动一个符号, 然后重复(1)~(4)步。

上述频域捕获算法 1 对频偏不敏感, 但是在高多普勒动态下, 频率变化率会导致频谱幅度出现“平台效应”^[8], 捕获性能急剧恶化。如图 4 所示, 参数 (L_F, L_D, N) 为 $(2304, 12, 192)$ 的突发帧, 当归一化频率变化率为 1×10^{-5} 时, 频谱峰值特性完全消失。为了解决该问题, 可以对频率变化率进行分区预置, 然后多通道并行捕获, 但这会大幅度提高实现复杂度^[9]。



(a) The normalized frequency rate of 0



(b) The normalized frequency rate of 1×10^{-5}

图4 算法 1 中频率变化率对信号频谱的影响

Fig.4 Influence of frequency rate on signal spectrum in Algorithm 1

2.2 联合频率变化率估计的频域捕获算法

在低信噪比条件下, 频率变化率估计一般需要导频辅助, 因而需要先进行突发捕获。但是, 从 2.1 节的分析可以看出, 在高多普勒动态下, 为了满足频域突发捕获性能要求, 需要先对频率变化率进行

估计和补偿。因此,突发捕获和频率变化率估计在处理先后上存在矛盾。本文提出一种联合频率变化率估计的频域捕获,算法描述如下(算法2):

(1)当接收到一个新的基带信号符号 $r(n)$,执行式(2)得到 $z(n)$;

(2)对 $z(n)$ 进行间隔为 M 的共轭差分,若不考虑噪声 $w(n)$ 的影响,可得

$$x(n) = z(n+M) \cdot z^*(n) = g(n) \cdot \exp(j2\pi\alpha ML_D^2 n) \quad n=0, 1, \dots, N-M-1 \quad (5)$$

式中

$$g(n) = s((n+M)L_D) \cdot p^*(n+M) \cdot s^*(nL_D) \cdot p(n) \cdot \exp(j2\pi(f_d ML_D + 0.5\alpha M^2 L_D^2)) \quad (6)$$

当接收信号导频符号与本地导频符号对齐时, $g(n)$ 为常数, $x(n)$ 成为频率为 αML_D^2 的单载波信号。

(3)在 $x(n)$ 后补0,得到

$$\hat{x}(n) = \begin{cases} x(n) & n=0, 1, \dots, N-M-1 \\ 0 & n=N-M, N-M+1, \dots, N_2-1 \end{cases} \quad (7)$$

(4)对 $\hat{x}(n)$ 进行 N_2 点的FFT变换得到 $X(k)$,并搜索得到频谱峰值所在位置 γ ,计算归一化频率变化率 α 的估计值

$$\hat{\alpha} = \begin{cases} \frac{\gamma}{N_2 ML_D^2} & \gamma \leq N_2/2 \\ \frac{(\gamma - N_2)}{N_2 ML_D^2} & \gamma > N_2/2 \end{cases} \quad (8)$$

(5)对 $z(n)$ 进行频率变化率补偿

$$y(n) = z(n) \cdot \exp(-j\pi\hat{\alpha}n^2 L_D^2) \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

(6)在 $y(n)$ 后补0,得到

$$\hat{y}(n) = \begin{cases} y(n) & n=0, 1, \dots, N-1 \\ 0 & n=N, N+1, \dots, N_3-1 \end{cases} \quad (10)$$

(7)对 $\hat{y}(n)$ 进行 N_3 点的FFT变换得到 $Y(k)$,然后计算频谱峰值和均值,得到判决量

$$J' = \frac{\max(|Y(k)|)}{\text{mean}(|Y(k)|)} \quad (11)$$

(8)对于给定的捕获门限 J'_th ,如果 $J' \geq J'_th$,则认为捕获到突发信号;否则,收到下一个符号后,将接收数据向后移动一个符号,然后重复步骤(1)~(8)。

上述算法2中,在突发起始未知情况下,每接收到一个符号,假定其为突发起始,进行基于导频辅助的频率变化率估计和补偿,并利用FFT变换

对突发捕获进行判定。当接收信号导频符号与本地导频符号对齐时,频率变化率估计正确,在进行补偿后,消除了其对突发捕获的影响。如图5所示,当归一化频率变化率为 1×10^{-5} 时,频谱峰值特性与图4(a)基本一致。

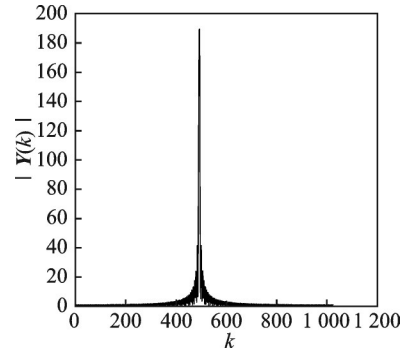


图5 算法2中频率变化率对信号频谱的影响(归一化频率变化率为 1×10^{-5})

Fig.5 Influence of frequency rate on signal spectrum in Algorithm 2 (The normalized frequency rate of 1×10^{-5})

3 基于译码软输出度量的最优选择

常用的载波同步主要分为数据辅助算法^[10-13]和非数据辅助算法^[14-15]。对于直升机卫星通信,为了对抗周期性遮挡,这里采用基于分散导频的数据辅助算法。由于分散导频等效符号速率仅为载波速率的 $\frac{1}{L_D}$,频偏估计范围相应降低为 $\frac{1}{L_D}$ 。当实际频偏超出算法能够适应的最大频偏范围 $[-f_{sub}, f_{sub}]$ 后,估计频偏为伪值,解调输出仍然存在频偏,导致大量的错误。对于采用软信息的信道译码(包括LDPC、TPC、Turbo等),译码软输出信号幅度(即后验概率)与误码率密切相关,可以作为解调性能的评判准则。

假设对应预补偿频偏 f_n 的译码软输出为 $g^{(n)}(k) (k=0, 1, \dots, L_c-1)$, L_c 为编码块长。定义目标函数

$$G(n) = \sum_{k=0}^{L_c-1} |g^{(n)}(k)| \quad n=0, 1, \dots, H-1 \quad (12)$$

受频偏和信噪比影响, $G(n)$ 呈现出不同的统计特性。图6所示为1个长度为1200的Turbo码,在不同的归一化频偏和信噪比下,经过10次迭代后的译码软输出目标函数统计。

可以看出,在同一信噪比下,当归一化频偏为0时, $G(n)$ 具有唯一的全局最大值,此时译码输出结果具有最低的误码率。因此,对于 H 路译码软

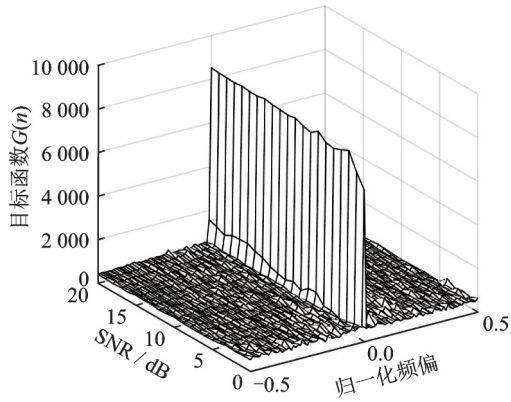


图 6 信噪比和频偏对目标函数值的影响

Fig.6 Influence of SNR and frequency offset on objective function

输出 $g^{(n)}(k)$, 可以选择具有最大目标函数值的 1 路作为最终输出结果 $g(k)(k=0, 1, \dots, L_c - 1)$, 即

$$g(k) = \arg \max_n G(n) \quad n = 0, 1, \dots, H - 1 \quad (13)$$

4 性能评估

通过算法仿真,从误码率(Bit error rate, BER)及误帧率(Frame error rate, FER)两方面评估直升机旋翼遮挡信道下的接收性能,并与 AWGN 信道下的理论性能进行比较,如图 7 所示。

仿真条件:载波符号速率 8 ksps,突发帧参数 (L_F, L_D, N) 为 (2 304, 12, 192),调制方式 QPSK, Turbo 编码(码率 1/3、码长 2 112)。频率变化率 2 000 Hz/s,旋翼遮挡周期 $T_c = 40$ ms、遮挡持续时长 $T_b = 6$ ms、衰落深度 $P_b = 20$ dB。

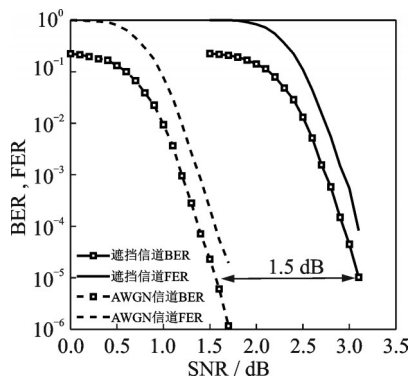


图 7 仿真性能

Fig.7 Simulation performance

仿真结果表明,在给定的旋翼遮挡信道下,与无遮挡高斯白噪声信道理论性能相比,误码率 $1E-5$ 时的解调门限仅提高 1.5 dB。与文献[4]中典型的前向链路两重组帧重发、返向链路缝隙突发传输方式相比,前向链路信噪比损失降低 1.5 dB,

返向链路信噪比损失增大 0.2 dB。此外,该算法可以工作在较低的信噪比门限下,且能够适应高多普勒动态,可以满足低速直升机卫星通信需求。

5 结 论

针对低速直升机卫星通信,提出一种联合频率变化率估计的频域捕获算法,消除了频率变化率对捕获性能的影响。同时,针对基于分散导频的数据辅助算法频偏估计范围较小的问题,采用频偏分区预置,并根据译码软输出构建目标函数,选择具有最大目标函数值的一路作为最终输出。仿真表明,所述突发解调方法在典型直升机信道环境下,链路性噪比损失较小。在卫星处理载荷、直升机卫通终端设备研制中,具有一定的应用前景。

参考文献:

[1] NEILL J O, WILCOXSON D, CHESTER D, et al. Helicopter Ku-band SATCOM on-the-move [C]// Proceedings of MILCOM 2006. Washington DC, United States: IEEE Military Communications Conference, 2006.

[2] ITO R, KOJIMA T. A study on code synchronization for time diversity in helicopter satellite communications [C]// Proceedings of the 10th International Conference on Advanced Technologies for Communications. Quynhon City, Vietnam: IEEE Computer Society, 2017.

[3] 李胜峰,王子豪,陈翔,等. 直升机旋翼遮挡缝隙时长预测算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(6): 113-121.
LI Shengfeng, WANG Zihao, CHEN Xiang, et al. Research on the slot length prediction algorithm for the helicopter rotor blade[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2020, 47(6): 113-121.

[4] 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 LinLing, NI Zuyao, FAN Mingqing, et al. Channel prediction and variable rate coding for helicopter broadband multimedia satellite communications [C]// Proceedings of the 8th Annual Conference on Satellite Communications. Beijing: Satellite Communications Committee of China Institute of Communications, 2012: 272-278.

[5] FINES P, CHRISTOFYLAKI E, KHAN A H, et

- al. Helicopter propagation effects and countermeasures for reliable bandwidth efficient communications via satellite[C]//Proceedings of the 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Florence, Italy: American institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [6] 杜谦. 一种实用的MPSK/TDMA突发信号盲解调方案[J]. 无线电工程, 2016, 46(3): 5-17, 61.
DU Qian. A practical scheme for blind demodulation of MPSK/TDMA burst signals[J]. Radio Engineering, 2016, 46(3): 5-17, 61.
- [7] 刘洋. 基于离散傅里叶变换的高动态突发信号检测及频率估计[J]. 电讯技术, 2016, 56(5): 557-561.
LIU Yang. Signal detection and frequency estimation of high dynamic burst signals based on discrete Fourier transform[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(5): 557-561.
- [8] 赵睿, 王彦文. 低信噪比条件下快变多普勒频偏捕获算法[J]. 电讯技术, 2014, 54(5): 553-558.
ZHAO Rui, WANG Yanwen. A fast changing Doppler frequency offset acquisition algorithm under low SNR[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5): 553-558.
- [9] 熊竹林, 刘策伦, 安建平, 等. 低复杂度高动态低信噪比环境下的GPS信号捕获算法[J]. 通信学报, 2015, 36(3): 179-184.
XIONG Zhulin, LIU Celun, AN Jianping, et al. Low complexity acquisition algorithm for GPS signals with low SNR and high dynamic[J]. Journal on Communications, 2015, 36(3): 179-184.
- [10] MENGALI U, MORELLI M. Data-aided frequency estimation for burst digital transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(1): 23-25.
- [11] LUISE M, REGGIANNINI R. Carrier frequency recovery in all-digital modems for burst-mode transmissions[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(3): 1169-1178.
- [12] FTIZ M P. Planar filtered techniques for burst mode carrier synchronization[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM'91. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 1991.
- [13] 龚超, 张邦宁, 郭道省. 基于FFT的快速高精度载波参数联合估计算法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 766-770.
GONG Chao, ZHANG Bangning, GUO Daosheng. A quick and accurate union carrier parameter estimation algorithm based on FFT[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 766-770.
- [14] 苑小华, 罗武忠, 罗来源. MPSK信号载波频率盲估计[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1148-1150.
YUAN Xiaohua, LUO Wuzhong, LUO Laiyuan. Blind carrier frequency estimation for MPSK signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(5): 1148-1150.
- [15] 安琦, 何子述, 李会勇. 一种改进的无数据辅助频偏估计算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(11): 66-69.
AN Qi, HE Zishu, LI Huiyong. An improved non-data-aided frequency shift estimation algorithm[J]. Computer Engineering, 2017, 43(11): 66-69.

(编辑: 孙静)