

# 一种短时猝发 GMSK 扩频多普勒估计算法研究

欧家成<sup>1</sup>, 廖小海<sup>2</sup>, 张显辉<sup>1</sup>, 王 慧<sup>1</sup>, 许 洋<sup>1</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 中国航天电子技术研究院 北京 100094)

**摘要:** 多普勒估计是猝发传输背景下的 GMSK (Gaussian Filtered Minimum Shift Keying, 高斯最小频移键控) 扩频通信系统接收端同步过程中的关键一环。针对短时猝发 GMSK 扩频通信系统信息传输时间极短的特点, 搭建了系统接收端同步段结构, 并以此为基础设计了适应该短时猝发同步段结构的多普勒估计算法, 建立了短时猝发多普勒估计算法模型, 推导该算法公式的同时对算法模型进行了理论分析, 详细阐述了该算法进行多普勒估计的实现过程, 并对该算法进行仿真实验。实验结果表明, 该算法在信噪比为 1 dB 时, 多普勒估计准确度可达到 97.2%, 信噪比 $\geq 3$  dB 时, 准确度均能在 99% 及以上, 该结果验证了该算法应用在猝发传输背景下的 GMSK 扩频通信系统中的有效性、可行性, 同时也表明当通信系统处于弱信号的条件时, 该多普勒估计算法性能依然能达到一个较为优异的准确度值。

**关键词:** 多普勒估计; 多普勒频移; 扩频通信; GMSK; 猝发传输

中图分类号: TN914.42 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)01-0060-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231023002

引用格式: 欧家成, 廖小海, 张显辉, 等. 一种短时猝发 GMSK 扩频多普勒估计算法研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(1): 60-66.

## Research on A Short Burst GMSK Spread Spectrum Doppler Estimation Algorithm

OU Jiacheng<sup>1</sup>, LIAO Xiaohai<sup>2</sup>, ZHANG Xianhui<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, XU Yang<sup>1</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Doppler estimation is a key link in the synchronization process of GMSK spread spectrum communication system receivers in the context of burst transmission. Given the extremely short information transmission time associated with short-duration burst GMSK spread spectrum communication systems, the synchronization segment structure of the system receiver is built. Based on this, a Doppler estimation algorithm adapted to the short-time burst synchronization segment structure is designed. The short-time burst Doppler estimation algorithm model is established. The algorithm formula is derived and the algorithm model is theoretically analyzed. The implementation process of the algorithm for Doppler estimation is described in detail, and the algorithm is simulated. The experimental results demonstrate that the Doppler estimation accuracy of the algorithm can reach 97.2% when the signal-to-noise ratio is 1 dB, and it exceeds 99% when the signal-to-noise ratio is greater than or equal to 3 dB. These findings validate the effectiveness and feasibility of the algorithm in GMSK spread spectrum communication systems within the context of burst transmission. It also shows that the Doppler estimation algorithm can still achieve superior accuracy even under weak signal conditions within the communication system.

**Keywords:** Doppler estimation; Doppler frequency shift; Spread spectrum communication; GMSK; Burst communication

**Citation:** OU Jiacheng, LIAO Xiaohai, ZHANG Xianhui, et al. Research on A Short Burst GMSK Spread Spectrum Doppler Estimation Algorithm[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 60-66.

## 0 引言

GMSK 拥有较快的带外衰减和较为紧凑的频谱,这意味着 GMSK 尤其适合应用于扩频系统<sup>[1-4]</sup>。两者结合后的 GMSK 扩频通信系统具有频带衰减快、抗干扰性能好等优点,广泛应用于猝发传输通信、卫星移动通信、移动自组网等场景下<sup>[5]</sup>。

猝发传输通信的最明显特征是其信息的传输为短时猝发,当下 GMSK 扩频通信系统的很多应用场景都是处于短时猝发条件之下。而猝发传输通信的原理是将信息处理后在很短的时间内传输出去<sup>[6]</sup>,接收端使用对应的信号处理技术将信号复原。其特点主要有:信息传输时隙很短,增加了信息传输随机性,降低了信号传输过程中被截获的概率,在一定程度上提升了通信系统传输的隐蔽性、抗干扰性。

以 GMSK 扩频为基础的猝发传输通信系统,是当下也是未来的重点研究对象。当前国内外在该领域的研究方向主要有:通过分析 GMSK 调制算法和短时猝发条件下的解扩解调算法,并对其优化设计,增加扩频增益有效利用率,提升信号接收性能<sup>[7,8]</sup>;改进相关的视频同步算法,优化相关的编码算法,提升系统传输性能。其中主要的研究难点之一是对基于 GMSK 调制的猝发传输通信系统进行优化设计,使其具备接收灵敏、性能优异、同步时间短、正确率高、抗频偏性能好的优点,成为能适用于通信时隙短、定时同步要求高的一种传输系统。国内在猝发通信背景下对 GMSK 扩频通信系统的研究还不是很多,随着 GMSK 扩频通信应用的不断深入,由于猝发传输通信系统传输时隙极短,信号传输随机性强,使得对时频同步算法尤其是多普勒估计算法的创新及优化显得越发重要。

影响信号时频同步性能的一个关键因素是多普勒频移<sup>[9]</sup>,信号时频同步性能的优良与否将直接影响短时猝发 GMSK 扩频通信系统的整体性能<sup>[10]</sup>。学者们通过记录分析各种多普勒估计算法在短时猝发条件下的性能表现,进而优化算法以提高多普勒估计准确度,尤其是提高在弱信号条件下的多普勒估计准确度,从而来进一步提升短时猝发 GMSK 扩频通信系统的接收端性能<sup>[11-13]</sup>。

若要对多普勒估计算法进行创新优化,就要以能适应短时猝发条件的 GMSK 扩频通信系统同

步段结构为研究基础,同步段的结构设计要优先考虑猝发传输通信传输时间极短的特点,而后根据该同步段结构,优化设计具体的多普勒估计算法,优化后的算法应在不同信噪比下进行仿真实验,使其多普勒估计准确度满足系统需求,特别是在弱信号条件下,提升其多普勒估计准确度,这既是本研究的关键点同时也是难点。本文以此为研究目的,基于短时猝发 GMSK 扩频通信系统的同步段结构,优化设计相应的多普勒估计算法,提高系统接收端多普勒估计准确度。

## 1 短时猝发 GMSK 扩频通信系统

短时猝发 GMSK 扩频通信系统框图如图 1、图 2 所示。GMSK 扩频通信系统会在发送端对输入的数据比特进行处理,使用伪码序列对其进行映射,而后引入调制相位到信息序列中,再转换为 I/Q 两路,将 I/Q 两路加以载波处理并完成合并,输出最终的 GMSK 扩频信号。接收端将接收信号转换为 I/Q 两路,由于 GMSK 为非线性调制方式,不能将本地的伪码序列直接与其相关,实际工程实现时是在滤波后将两路扩频调制信号与本地扩频调制波形样本相关,并根据所得到的相关峰值进行门限择大判决,伪码同步完成后开始解调,以恢复出原始数据,但由于短时猝发的条件,接收与同步的时间较短,系统接收端可以暂时缓存数据,随后再完成解调<sup>[14]</sup>。

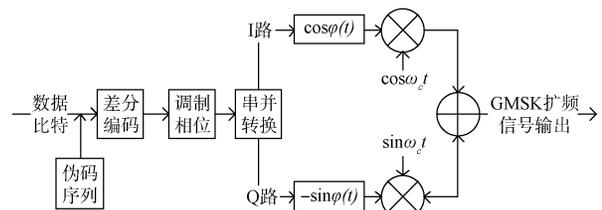


图 1 系统发送端框图

Fig. 1 Block diagram of transmitter in communication system

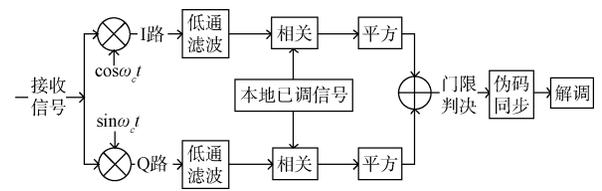


图 2 系统接收端框图

Fig. 2 Block diagram of receiver in communication system

猝发通信背景下的 GMSK 扩频通信系统主流频段具有频谱利用率高、低信号干扰等优点。但

这类频段通常来说频率都较高, 同时也会导致其多普勒频移很严重, 甚至很有可能频移远大于码率, 正是这个原因, 才导致对接收端捕获跟踪多普勒频移的性能指标有着更苛刻的要求<sup>[15]</sup>。并且由于在短时猝发条件下能用于捕获和同步的时间较短, 接收端的多普勒频移使信号捕获和同步的难度增加, 因此应对抗多普勒频移的方法改进创新, 提出优化多普勒估计算法, 以适应该环境, 使其能以良好的性能完成信号接收解调<sup>[16]</sup>。

## 2 短时猝发多普勒估计算法

### 2.1 算法模型架构设计

常用的 GMSK 扩频体制下的传统多普勒估计算法会选择瞬时的两个采样点直接进行叉积鉴频来完成多普勒估计, 并且该算法是在信号连续传输的同时, 持续地进行多次多普勒估计, 这种算法一方面会导致多普勒估计环节的总时长较长, 另一方面需要接收信号在一段时间内具有连续性。在短时猝发条件下, GMSK 扩频体制下传统多普勒估计算法在应用时, 会随着噪声功率的加大、信噪比的降低, 其准确度性能会在弱信号条件下极度恶化。因为猝发传输通信信号接收同步的时间本就很短, 则能用来完成多普勒估计的时间更短, 且猝发通信本身就有随机性、信号间断性, 所以一般常用的传统多普勒估计算法并不是很适合该条件下的 GMSK 扩频体制。考虑以上条件, 本算法将根据两个同步段中的伪码信号波形相关过程中的数据来完成多普勒估计。

图 3 中两个同步段的最小长度应为两个伪码周期长度, 例如本文后续实验采用了 64 位 M 序列, 则两个同步段的最小长度应为两组 64 位 M 序列周期长度, 这样便使同步段具备了完成两次相关过程的必需条件。除此之外, 工程实现时, 若还需要其他功能在此同步段实现, 例如要对两次相关过程数据的进行缓存等, 则应根据实际情况适当引入几个码片长度的冗余。

该模型结构一方面能满足猝发通信的瞬时性, 即两个同步段完成相关过程即可进行多普勒估计, 无须一直跟踪信号; 另一方面, 多普勒估计只需要根据两个同步段的相关过程所得数据即可完成, 不会占用其他时隙及资源, 为接收过程中的其他工作环节提供便利。

该通信系统接收端会将接收的扩频信号与本



图 3 同步段结构示意图

Fig. 3 Synchronized segment structure

地存储的已调信号波形样本进行相关, 每一次相关运算过程均在一个伪码周期内进行。若本地存储波形序列样本与收到的信号序列码片对齐, 那么在完成相关运算过程后, 其相关峰值大于设定阈值门限时, 则认为捕获成功。反之, 若不能出现较为明显的相关峰值以供门限阈值判决, 则意味着未能捕获成功。

图 3 中的两段同步段是使用完全相同的同一组扩频码进行调制的, 当这两个同步段再与本地已调的波形样本进行相关时, 便会出现两个相关峰, 如图 4 所示。这两个相关峰所对应的采样点之间的时间间隔是本算法实际计算估计多普勒频移时所需要的一项重要数据。

从时域上来看, 且在理想传输状态下, 两个相关峰所对应的采样点之间的时间间隔为一组已调伪码的周期时间, 而在仿真及工程实现时, 两点之间的时间间隔因噪声等影响并不会完全等于一组已调伪码的周期时间, 应选取实际两个相关峰所对应的采样点, 并对其所处的两个瞬时时间点进行作差, 从而获得实际的时间间隔。

猝发通信中, 能提供给时频同步环节的时间很短, 一般猝发通信的同步环节中的时隙量级为微秒级甚至纳秒级。在本文的短时猝发 GMSK 扩频通信体制下, 其接收端时频同步环节中的多普勒修正只需要几个时钟进行一个下变频即可, 而关键在于需要多久来完成多普勒估计运算, 在短时猝发条件下, 该运算过程一般限制在十几个到几十个时钟来完成, 具体周期长短也要结合软件代码及硬件条件来看。接收端在两个同步段完成相关后采取延迟或缓存的方式处理后续信号数据, 等待多普勒估计运算及修正等步骤结束。算法模型如图 5 所示, 由于两个同步段在相关过程中各出现一个相关峰, 在对本地已调波形样本取共轭后, 相关峰对应的两个信号波形采样点与其对应的本地波形样本相乘, 根据两个相乘后的结果进一步运算即可得出频偏估计值。具体算法分析及公式推导在下一小节会详细说明。

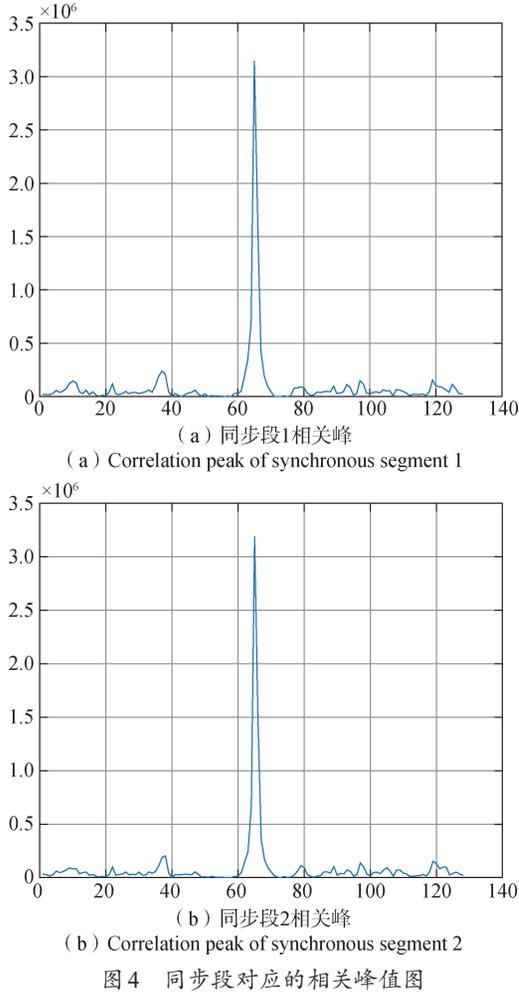


Fig. 4 The correlation peak corresponding to the synchronization segment

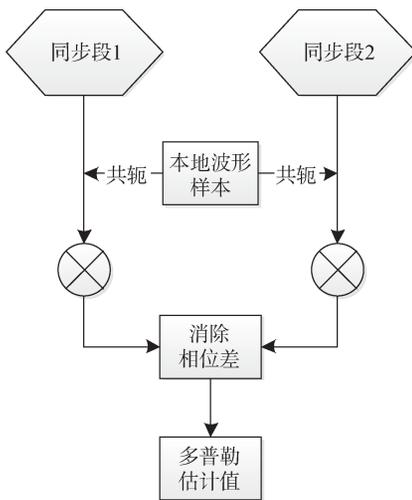


Fig. 5 Doppler estimation algorithm block diagram

## 2.2 算法分析及理论推导

该短时猝发 GMSK 扩频通信系统接收信号可

表达为:

$$y(t) = \cos[(\omega_c + \omega_D)t + \varphi(t) + \theta] \quad (1)$$

$$\varphi(t) = \frac{\pi}{2T} \int_{-\infty}^t \left[ \sum_n a_n g\left(\tau_1 - nT - \frac{T}{2}\right) \right] d\tau_1 \quad (2)$$

式中,  $\omega_c$  为载波频率;  $\omega_D$  为多普勒频移;  $\varphi(t)$  为调制相位;  $a_n$  为数据比特;  $n$  为第  $n$  个数据比特;  $T$  为码片周期;  $\theta$  为发射端与接收机的相位差。

依图2, 推导相关公式。其中, I路信号可表示为:

$$y_{1c}(t) = \cos((\omega_c + \omega_D)t + \varphi(t) + \theta) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

在经过低通滤波后, 与本地已调信号样本相关, 则有I路相关式:

$$y_{1c}(t) = \int_0^T \cos[\omega_D \tau_2 + \varphi(\tau_2) + \theta] \cdot \cos[\varphi(\tau_2 - t)] d\tau_2 \quad (4)$$

相比于码片未对齐时刻, 码片对齐时刻对相关结果影响更大, 则假定  $t=0$  为码片对齐时刻则有:

$$y_{1c}(0) = \int_0^T \cos[\omega_D \tau_2 + \varphi(\tau_2) + \theta] \cdot \cos[\varphi(\tau_2)] d\tau_2 \quad (5)$$

将式(2)代入式(5)后计算可得:

$$y_{1c}(0) = \frac{\sin(\omega_D T + \theta)}{2\omega_D} + \frac{\sin\left[\omega_D T + \frac{\pi}{T} \sum_n a_n \int_{-\infty}^T g\left(\tau_1 - nT - \frac{T}{2}\right) d\tau_1 + \theta\right]}{\omega_D + \frac{\pi}{T} \sum_n a_n g\left(\tau_2 - nT - \frac{T}{2}\right)} \quad (6)$$

Q路相关式同理。对两路相关峰值取平方和, 可得最终的信号相关峰值。此时, 在得到两个同步段对应的相关峰值后, 根据两个相关峰对应的采样点, 得到其对应的I、Q两路信号, 滤波后可得:

$$y_1(t_1) = \cos(\omega_D t_1 + \varphi(t_1) + \theta) \quad (7)$$

$$y_Q(t_1) = -\sin(\omega_D t_1 + \varphi(t_1) + \theta) \quad (8)$$

$$y_1(t_2) = \cos(\omega_D t_2 + \varphi(t_2) + \theta) \quad (9)$$

$$y_Q(t_2) = -\sin(\omega_D t_2 + \varphi(t_2) + \theta) \quad (10)$$

其中,  $t_1, t_2$  为两个相关峰对应的采样点所出现的瞬时时间。

将式(7)和式(8), 式(9)和式(10)分别合并表示为指数形式:

$$y(t_1) = e^{-i(\omega_D t_1 + \varphi(t_1) + \theta)} \quad (11)$$

$$y(t_2) = e^{-i(\omega_D t_2 + \varphi(t_2) + \theta)} \quad (12)$$

在相关过程中, 对本地波形样本取共轭, 并将  $t_1, t_2$  两点信号波形与其对应的具有相同调制相位的本地波形样本相乘, 则有:

$$y'(t_1) = e^{-i(\omega_D t_1 + \varphi(t_1) + \theta)} \cdot e^{i\varphi(t_1)} = e^{-i(\omega_D t_1 + \theta)} \quad (13)$$

$$y'(t_2) = e^{-i(\omega_D t_2 + \varphi(t_2) + \theta)} \cdot e^{i\varphi(t_2)} = e^{-i(\omega_D t_2 + \theta)} \quad (14)$$

对其进行以下运算即可消除发射端与接收机的相位差:

$$\frac{y'(t_1)}{y'(t_2)} = e^{i\omega_D(t_2 - t_1)} = \cos \omega_D(t_2 - t_1) + i \sin \omega_D(t_2 - t_1) \quad (15)$$

由 (15) 式实部和虚部可得:

$$\frac{\sin \omega_D(t_2 - t_1)}{\cos \omega_D(t_2 - t_1)} = \tan \omega_D(t_2 - t_1) \quad (16)$$

(13)和(14)式的结果可以从相关过程中提取得到具体数值, 对其加以上述运算即可得到(16)式的值, 而后对(16)式结果反正切即可得到相位估计值, 由上文可知, 可根据实际两个相关峰对应的采样点, 对采样点所处的两个瞬时时间点进行作差以得到时间间隔  $(t_2 - t_1)$ , 将相位估计值除以时间间隔  $(t_2 - t_1)$  即可求得  $\omega_D$  的估计值。

### 3 仿真分析

根据上一节推导分析结果进行仿真实验, 将 GMSK 扩频体制下的传统多普勒估计算法与本文提出的多普勒估计算法进行准确度仿真实验对比。对比实验中的传统多普勒估计算法包括了传统的叉积鉴频多普勒估计方法, 基于最小二乘法的导频估计方法以及传统的 FFT 多普勒估计方法。

仿真参数设置码率为 8 Mbps, BT 值为 0.3, 8 倍采样, 信道噪声模型为 AWGN, PN 码为 64 位 M 序列, 仿真实验的信噪比分别设置为 1 dB、3 dB、5 dB、7 dB、9 dB。预设多普勒频移值由 0 kHz 到 10 kHz, 每步进 500 Hz 与多普勒估计值进行一次比对, 直到步进到 10 kHz 进行最后一次比对为止。仿真实验预设了五个信噪比, 共完成了五个多普勒预设值与估计值的步进对比过程, 每个过程对比 21 次, 通过估计值与预设值的差值可算出每次多普勒估计准确度, 表 1、表 2 中准确度数值为准确度平均值。

表 1 传统多普勒估计算法在不同信噪比下的准确度表现  
Table 1 Doppler estimation accuracy of traditional algorithm under different SNRs

传统叉积鉴频估计法		最小二乘导频估计法		传统 FFT 估计法	
信噪比	准确度	信噪比	准确度	信噪比	准确度
1 dB	76.2%	1 dB	69.2%	1 dB	65.1%
3 dB	94.5%	3 dB	86.4%	3 dB	87.8%
5 dB	98.3%	5 dB	97.9%	5 dB	96.6%
7 dB	99.0%	7 dB	99.1%	7 dB	99.4%
9 dB	99.6%	9 dB	99.5%	9 dB	99.7%

表 2 本文设计的多普勒估计算法在不同信噪比下的准确度表现  
Table 2 Doppler estimation accuracy of the optimized algorithm under different SNRs

信噪比	准确度
1 dB	97.2%
3 dB	99.0%
5 dB	99.2%
7 dB	99.6%
9 dB	99.7%

由表 1 可以看出, 传统的多普勒估计算法在五个预设信噪比条件下有着不同程度的性能恶化, 尤其是在 1 dB 时, 其准确度过低, 此弱信号状态下的多普勒估计值是没有意义的。而由表 2 可得, 本文设计的多普勒估计算法在信噪比为 1 dB 时, 其多普勒估计准确度达到 97.2%, 而在信噪比  $\geq 3$  dB 时, 多普勒估计准确度均能达到 99% 及以上, 在五个预设信噪比下的准确度均高于传统多普勒估计算法的准确度。以上结果说明了该算法在不同信噪比下均有优异的表现, 尤其是在弱信号状态下, 依然有着较高的多普勒估计准确度。图 6 为本文设计的多普勒估计算法在不同信噪比下的多普勒估计准确度曲线, 从图中可以看出, 在五个不同的预设信噪比下, 本文设计的多普勒估计算法准确度仿真曲线变化相差不大, 准确度数值较为优异且稳定。但该算法在信噪比小于 1 dB 时, 也出现了性能恶化的现象, 尤其是在信噪比为负数值时, 该算法多普勒估计准确度恶化到 80% 以下, 未来在此基础上应进一步优化该算法, 使其在更加极端的条件下能拥有更高的多普勒估计准确度。

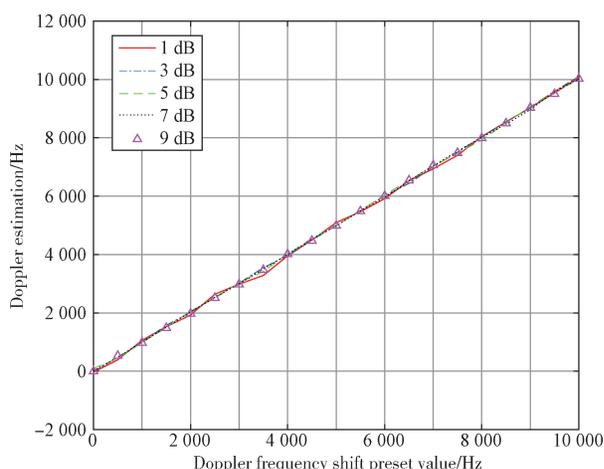


图6 不同信噪比下的多普勒估计准确度曲线

Fig. 6 Doppler estimation accuracy curves under different SNRs

#### 4 结束语

由于猝发传输通信具有传输时间极短的特点,则需要考虑如何在非常有限的时间内完成同步过程中的多普勒估计环节。本文针对此问题,构建了猝发传输通信系统接收端同步段结构,并以此为基础优化设计了多普勒估计算法,使系统接收端能在短时间内完成多普勒估计。本文根据算法模型进行了仿真实验,并设置GMSK扩频体制下的传统多普勒估计算法为对照组,本文设计的多普勒估计算法在信噪比为1 dB时,其多普勒估计准确度能达到97.2%,在信噪比 $\geq 3$  dB时,准确度能达到99%及以上,与对照组仿真数据比较后,在不同信噪比下该多普勒估计算法比传统算法的准确度均有提升。结果表明:该算法能满足短时猝发的应用条件,多普勒估计准确度高,尤其是在弱信号条件下,依然有着较高的多普勒估计准确度,同时该结果也为后续进一步提升短时猝发GMSK扩频通信系统接收性能的研究提供了基础。未来将针对更为极端的弱信号条件,优化该多普勒估计算法,进一步提升多普勒估计准确度。

#### 参考文献

- [1] BISWAS P, PANDEY C, THAKUR A K, et al. Algorithm design simulation performance analysis of mimo gmsk system for radio communication on awgn channel[C]// 2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), 2020: 1261-1264.
- [2] SENTHIL K K, PALANIVELAN M, ASOKAN V, et al. Performance analysis of gmsk-based cooperative communication in wireless sensor networks[J]. Telecommunications and Radio Engineering, 2023, 82(2): 45-52.
- [3] 丁兴文,朱智勇,李海涛.基于维特比算法的GMSK信号非相干解调技术研究[J].遥测遥控,2011,32(1): 18-21.  
DING Xingwen, ZHU Zhiyong, LI Haitao. Noncoherent demodulation with viterbi decoding for gmsk signals[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2011, 32(1): 18-21.
- [4] AHMAD R, SRIVASTAVA A. PAPR reduction of OFDM signal through DFT precoding and GMSK pulse shaping in indoor VLC[J]. IEEE Access, 2020, 8:122092-122103.
- [5] LIU S, LUO S. PN code tracking aided by GMSK signal algorithm based on GMSK+PN-FH[C]//2022 4th International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST), 2022: 842-847.
- [6] 吴宇飞,刘琰,高军军.高动态猝发扩频信号低复杂度快速捕获技术[J].计算机仿真,2021,38(10): 43-47, 63.  
WU Yu fei, LIU Yan, GAO Jun jun. High dynamic burst spread spectrum signal low complexity rapid acquisition technology[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10), 43-47, 63.
- [7] YU M, LI C, XU B, et al. GMSK Modulated DSSS signal separation based on principal component analysis[C]// 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT), 2020: 1271-1275.
- [8] 陈伟波,艾伦,黄晓瑞,等.导航卫星有效载荷新型扩频码研究及实现[J].遥测遥控,2020,41(2): 43-48.  
CHEN Weibo, AI Lun, HUANG Xiaorui, et al. Research and implementation of a new kind of spreading code for navigation satellite payload[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(2): 43-48.
- [9] WANG J, CUI Y, HAN G, et al. Improved doppler shift estimation algorithm for down-link signals of space-based ais[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 11028-11032.
- [10] 邹盼盼,杨林.基于GMSK调制的短时猝发系统的时频同步方案的设计[J].信息通信,2020(6): 87-89.
- [11] SEDIVY P, PIDANIC J. Doppler frequency estimation

- using moving target detection filter bank[C]//2021 International Symposium ELMAR, 2021: 111-116.
- [12] CHIN W L, LIN J H, WU W C, et al. Doppler frequency estimation based on time diversity of random processes in doubly-selective channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2707-2711.
- [13] 王云静, 张晓林, 郑昆. 一种基于全相位预处理的 PMF-FFT 改进算法[J]. 遥测遥控, 2018, 39(3): 15-20.  
WANG Yunjing, ZHANG Xiaolin, ZHENG Kun. An improved PMF-FFT algorithm based on all phase preprocessing[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(3): 15-20.
- [14] WANG G, CHEN J, BAO Z, et al. The implement of synchronization and differential demodulation algorithm of GMSK signal[C]//2023 4th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI), 2023: 22-26.
- [15] ZHANG X, GUO D, ZHOU J, et al. Time-frequency joint frequency offset estimation algorithm for gmsk modulation[C]// 2022 2nd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Technology (EIECT), 2022: 405-409.
- [16] 田成富, 解嘉宇, 周音, 等. GMSK 通信系统中频偏估计改进算法[J]. 移动通信, 2022, 46(9): 35-38, 57.  
TIAN Chengfu, XIE Jiayu, ZHOU Yin, et al. An improved frequency offset estimation algorithm for GMSK communication systems[J]. Mobile Communication, 2022, 46(9): 35-38, 57.

#### [作者简介]

- 欧家成 1999 年生, 硕士研究生。  
廖小海 1973 年生, 博士, 研究员。  
张显辉 1976 年生, 硕士, 研究员。  
王 慧 1991 年生, 硕士, 工程师。  
许 洋 1995 年生, 硕士, 工程师。

(本文编辑: 潘三英)