

激光与光电子学进展

基于调制码元多普勒测量的相干光通信测速方法研究

张权^{1,2,3,4}, 徐轻尘^{1,3,4*}, 胡雄^{1,3,4}, 吴小成^{1,3,4}, 杨钧烽^{1,3,4}¹中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;²中国科学院大学, 北京 100190;³空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;⁴中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

摘要 高精度的星间测速技术是实现卫星激光通信测量一体化和自主导航的关键技术之一。提出了一种基于调制码元多普勒测量的星间相干光通信链路的测速方法,采用单程单向的方式,在接收端利用码元符号同步和判决相位及符号信息,去除基带采样数据中的相位调制信息,获取相位连续的码元多普勒信号,可在完成星间通信的同时,实现对卫星相对运动速度的实时高精度测量。仿真结果验证了该方法可在通信速率为 1 Gbit/s、误码率(BER)为 10^{-9} 情况下,实现 0~11.625 km/s 的相对速度测量,速度测量不确定度优于 10.00 mm/s。

关键词 光通信; 卫星测速; 调制码元; 多普勒频移

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231276

Coherent Optical Communication Speed Measurement Method Based on Modulated Code Element Doppler Frequency Measurement

Zhang Quan^{1,2,3,4}, Xu Qingchen^{1,3,4*}, Hu Xiong^{1,3,4}, Wu Xiaocheng^{1,3,4}, Yang Junfeng^{1,3,4}¹National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;³State Key Laboratory of Space Weather, Beijing 100190, China;⁴Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract High precision inter-satellite velocity measurement technology is one of the key technologies for realizing integration of satellite laser communication measurements and autonomous navigation. We propose an inter-satellite coherent optical communication link velocity measurement method based on modulated code element Doppler measurement. The method adopts a one-way unidirectional approach to obtain phase-continuous code element Doppler signals by using the phase and symbol information of code element symbol synchronization and verdict at the receiver side and by removing the phase modulation information in the baseband sampling data. This can aid in realizing the real-time high accuracy of satellite relative motion velocity while completing inter-satellite communication. The simulation results verify that this method can achieve the relative velocity measurement from 0 to 11.625 km/s at a communication rate of 1 Gbit/s and bit error rate (BER) of 10^{-9} . Furthermore, the velocity measurement uncertainty exceeds 10.00 mm/s.

Key words optical communications; satellite velocity measurement; modulation code elements; Doppler frequency shift

1 引言

激光通信测量一体化技术,是一种结合了激光探测、激光通信和信号处理的综合技术。该技术以激光信号作为传输载体,在完成激光通信的同时,实现对卫

星轨迹描述、星间距离测量、星间相对速度测量等功能。通信和测量不仅在硬件资源的使用上存在交叉,在信号处理流程上也有很多相似之处^[1-2]。除了实现通信之外,激光还能同时实现高精度的速度测量,这对实现卫星自主导航、航天精确测控等有着十分重要的

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-06-27; 录用日期: 2023-06-30; 网络首发日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(12241101,42174192)

通信作者: *xqc@nssc.ac.cn

意义^[3],在民用和军用领域有广阔的应用前景。

高精度星间相对速度测量是实现激光通信测量一体化的关键技术之一。目前,星间激光测速技术主要包括:1)基于通信信号进行速度测量的方案;2)增加测量光路进行测速的方案。2021年,邢强林等^[4]提出一种利用双向通信传输帧同步码测量距离、速度、钟差、频差的方法,在通信信息中加入测距码等测控信息,采用多路双向通信的方式,利用双端2对“测量帧”8个时间测量值,可以完成对距离和速度的测量。2019年,杨馥等^[5]提出一种基于伪随机码相位调制和外差探测技术的激光测速方法,对发射信号按照伪随机码信号进行相位调制,利用单向双程回波信号,可以实现4.16 cm/s的测速精度。2022年,电子科技大学的周东等^[6]提出一种激光通信探测装置及方法,可以在收发阶段对信号进行预处理,是一种单向单程的多载波测速测距技术,系统复杂度高。2020年,朱宏权等^[7]提出基于通断键控(OOK)体制的激光统一测控系统设计,利用双向激光调制信号实现距离和相对频差等信息的测量,测距随机误差为6.2 mm。

2016年,许云祥等^[8]提出一种基于外差探测实现卫星相干通信测速的方法,采用双向单程体制,两星同时向对方发送激光信标用于测速,并且需要在通信系统之外增加额外的速度测量模式,速度估计精度优于0.62 m/s。2019年,Xu等^[9]提出一种星间双向单程激光多普勒测速方法,在信噪比为16 dB时测速精度达到mm/s量级。2021年,杭州电子科技大学的张佳薇等^[10]提出了一种基于逆向调制器的测速系统,通过增加单独的逆向调制器和相干探测光模块,利用激光多普勒效应对逆向调制器端进行测速。

在精密科学测量领域,美国航空航天局于2002年成功发射GRACE卫星实现对重力场的探测^[11],采用双向单程的测量体制,能够以1 μm/s的测速精度测量双向星间距离变化。美国和德国在2018年联合研制GRACE Follow-on卫星系统,通过测量近地轨道两颗卫星距离的相对变化和速度,反演出地球的静态重力场及其随时间的变换^[12],采用单向双程的测量体制,实现同一台激光器发射的两束激光的相互干涉。空间引力波探测卫星LISA也计划采用星间激光干涉测量技术实现 2.5×10^6 km范围内的微小距离变化测量^[13]。上述技术均未应用于星间激光通信测量一体化系统。

综上所述,目前应用于激光通信的测速方法,大多需要在现有的激光通信系统中增加额外的速度测量装置或者速度测量模式,因而测量光路或电路的实现难度大,系统复杂度高,某些方法还存在探测距离受限等问题。本文针对星间激光通信测量一体化中的高精度星间相对速度测量问题,提出一种基于调制码元多普勒测量的相干光通信测速方法,仅采用单程单向的方式,在接收端利用码元符号同步和判决相位及符号信息,去除基带采样数据中的相位调制信息,获取相位连续的码元

多普勒信号,在完成星间通信的同时,实现卫星相对运动速度的实时高精度测量。该方法可应用于相移键控(PSK)调制的零差、外差和内差相干光通信系统。

2 基于调制码元多普勒测量的测速方案

2.1 测速原理

基于调制码元多普勒测量的相干光通信测速方法如图1所示。由卫星发射端发射的单向单程信号,经自由空间信道传输后,到达接收端卫星,由于两卫星的相对运动,激光载波和调制码元均会产生多普勒频移。

输出端发射光表示为

$$E_t(t) = A \exp\{j[2\pi f_c t + \varphi(t) + \varphi_0 + \theta_s]\}, \quad (1)$$

式中: A 为振幅; f_c 为激光载波频率; φ_0 为初相位; $\varphi(t)$ 为相位调制码元; θ_s 为信号光相位噪声。

假设在速度测量时间间隔 t 内,令其码元宽度为 T_s ,两卫星相对运动的平均径向速度为 v ,卫星间距变化为 R , c 为光速,则接收端光场为

$$E_r(t) = A_s \exp\{j[2\pi f_c t + \varphi(t) + \varphi_0 + \theta_s]\} \cdot \exp(-j2\pi f_c R/c) \exp(-j2\pi R/T_s c), \quad (2)$$

将 $R = vt$ 代入,上式可以改写为

$$E_r(t) = A_s \exp\{j[2\pi f_c t + \varphi(t) + \varphi_0 + \theta_s]\} \cdot \exp(-j2\pi K_f t) \exp(-j2\pi K_t t), \quad (3)$$

式中: A_s 是接收光振幅;由式(3)可知,激光载波和调制码元均产生了多普勒频移,其中 $K_f = f_c v/c$ 为激光载波的多普勒频移; $K_t = v/(T_s c)$ 为调制码元的多普勒频移;码速率为 $f_s = 1/T_s$ 。

将光学天线接收到的信号光与本振光进行混频,本振光可以表示为

$$E_{LO}(t) = A_{LO} \exp[j(2\pi f_{LO} t + \varphi_{LO} + \theta_{LO})], \quad (4)$$

式中: A_{LO} 为本振光幅值; f_{LO} 为本振光频率; φ_{LO} 为相位; θ_{LO} 为本振光的相位噪声。

在接收端进行相干解调,从探测器输出的基带电信号可以重建为复振幅形式

$$I(t) = 2\alpha A_s A_{LO} \cdot \exp\{j[2\pi f_{IF} t - 2\pi K_t t + \varphi(t) + \varphi_0 - \varphi_{LO} + \psi]\} + n(t), \quad (5)$$

式中: α 为探测器的响应度;中频信号 $f_{IF} = f_c(1 - v/c) - f_{LO}$; $\psi = \theta_s - \theta_{LO}$ 为总相位噪声; $n(t)$ 为解调链路中的加性噪声。对于零差接收, $f_{IF} = 0$;对于外差和内差接收,经过电域的载波恢复解调方法后, $f_{IF} = 0$ 。因此相干接收最终获得的基带信号表示为

$$I(t) = A_m \exp\{j[2\pi K_t t - \varphi(t) - \varphi_0 + \varphi_{LO} - \psi]\} + n(t), \quad (6)$$

式中: $A_m = 2\alpha A_s A_{LO}$;采样周期为 T ;模数转换(ADC)后的数字信号为 $I(mT)$, m 表示采样序列。

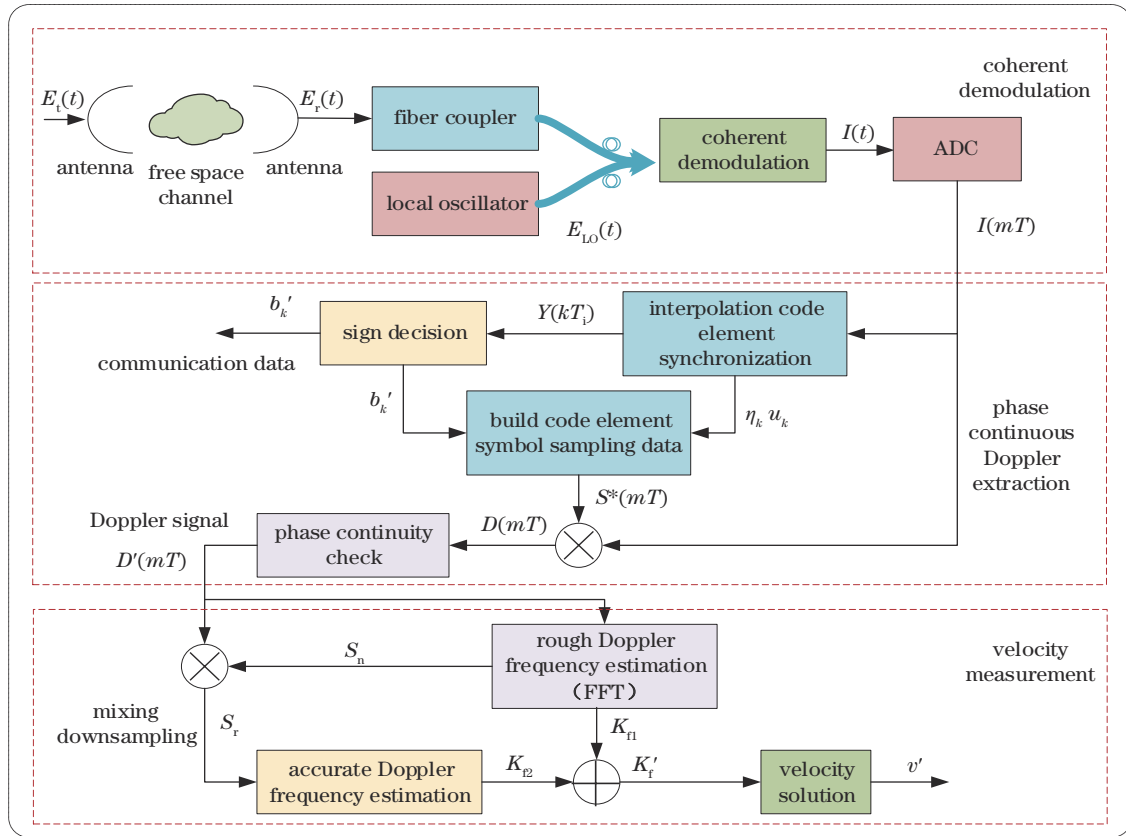


图 1 基于调制码元多普勒测量的相干光通信测速方法示意图

Fig. 1 Schematic of coherent optical communication velocity measurement method based on modulated code element Doppler measurement

由式(6)可知,在完成相干解调后,基带信号内包含码元多普勒频移和相位调制码元信息。利用通信支路的码元符号同步和判决相位及符号信息,剔除基带信号中的相位调制码元信息 $\varphi(t)$,便可获得相位连续的码元多普勒信号。对该信号进行频率分析和速度解算,即可完成对星间相对速度的测量。

2.2 测速流程

将基带采样数据分为通信和测速两个支路,通信支路完成码元符号同步等通信信号处理,测速支路完成速度测量。

这里本文以二进制相移键控(BPSK)调制相干接收通信体制为例,进行测速流程说明。其中,二相调制码元序列 $\varphi(t) = b_k g(mT - kT_s)$, b_k 表示发送的第 k 个码元符号, $b_k = 0$ 或 π , $k \in \mathbb{N}$, $g(t)$ 为成形函数。

1) 采用内插法对通信支路的基带采样数据进行码元符号同步,获取用于符号判决的采样序列 $Y(kT_i)$,并利用采样序列与基带数据的时序关系,获取符号同步定时信息 η_k, μ_k 。

任意时刻的插值输出可以表示为

$$y(t) = \sum_m I(mT) h_1(t - mT), \quad (7)$$

式中: $h_1(t)$ 表示内插滤波器的冲激响应。假设在 $t = kT_i$ 对 $y(t)$ 进行采样,得到该时刻的插值输出

$$Y(kT_i) = \sum_m I(mT) h_1(kT_i - mT), \quad (8)$$

式中: k 表示第 k 个内插值; T_i 是内插周期,当码元同步恢复时,即当插值点是最佳采样点时, $T_i = T_s$ 。

$Y(kT_i)$ 与基带采样数据的时序关系为

$$kT_i = (\eta_k + \mu_k)T, \quad (9)$$

式中: η_k, μ_k 分别表示内插周期和基带信号采样周期的调整关系。 $\eta_k = \text{int}[kT_i/T]$ (int[.] 代表向下取整运算), 决定了第 k 个内插值的内插基点,也决定了计算第 k 个内插值 $Y(kT_i)$ 所用的采样点; μ_k 为第 k 个码元的定时相位误差,指示了内插估值点,并决定用来计算内插值 $Y(kT_i)$ 的插值滤波器的脉冲响应值。 μ_k, η_k 的关系可以表示为 $\mu_k = kT_i/T - \eta_k$ 。

结合式(9)的码元符号同步定时信息,基带采样数据可以表示为

$$I(mT) = A_m \exp\left\{j\left\{2\pi K_i mT - b_k g\left[mT - (\eta_k + \mu_k)T + T_s/2\right] - \varphi_0 + \varphi_{LO} - \psi\right\}\right\} + n(mT). \quad (10)$$

2) 对内插得到的 $Y(kT_i)$ 进行码元判决,恢复发送的码元符号 b'_k

$$b'_k = \begin{cases} b_k, & \text{when the code element verdict is correct} \\ b_k \pm \pi, & \text{when the code element verdict is wrong} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: 当码元判决错误时, $b'_k = b_k \pm \pi$ 。

3) 利用码元符号判决结果 b'_k 和定时信息 μ_k, η_k , 构建“码元符号采样数据” $S(mT)$, 对第 k 个码元:

$$S(mT) = \exp\left\{j\left\{b'_k g[mT - (\eta_k + \mu_k)T + T_s/2]\right\}\right\}. \quad (12)$$

4) 将测速支路的基带采样数据与 $S(mT)$ 的共轭函数相乘, 获得初步去除码元相位跳变的码元符号多普勒频移信号。结合式(10)~(12)可得

$$D(mT) = I(mT) \times S^*(mT) = A_m \exp\left\{j\left\{2\pi K_f mT - (b_k - b'_k) \cdot g[mT - (\eta_k + \mu_k)T + T_s/2] - \varphi_0 + \varphi_{LO} - \psi\right\}\right\} + n'(mT), \quad (13)$$

式中: $n'(mT) = n(mT) \times S^*(mT)$, 仍为加性噪声。

5) 对码元符号多普勒频移信号 $D(mT)$ 进行相位连续性检查和相位跳变修复。受相位噪声的影响, 相邻基带采样点之间产生的随机相位差服从均值为 0、方差为 $2\pi\Delta\nu T$ ($\Delta\nu$ 为总光源线宽) 的高斯分布, 根据 3σ 准则, 噪声相邻相位差有 0.9544 的概率落在 $[-2\sqrt{2\pi\Delta\nu T}, 2\sqrt{2\pi\Delta\nu T}]$ 区间。因此当码元符号判决正确时, $D(mT)$ 是只含有多普勒频移 K_f 的相位连续数据, 相邻的数据点之间最大相位差 $\Delta\theta_{\max}$ 不超过 $\pm(2\pi K_{\max} T + 2\sqrt{2\pi\Delta\nu T})$, K_{\max} 是相对运动产生的最大多普勒频移; 当码元符号判决出现错误时, $D(mT)$ 在错误判决的码元符号处, 相邻数据之间会附加产生一个 $\pm\pi$ 的相位跳变。

对 $D(mT)$ 进行相位连续性检查, 若相邻数据点的相位差超过 $\Delta\theta_{\max}$, 则表明后一个数据点受到码元判决错误的影响, 此时, 令 $b'_k = b'_k \pm \pi$ 。其中, $\pm\pi$ 的符号由相邻数据点相位差的符号决定, 并重新产生码元符号采样数据, 如式(12)所示, 然后与基带信号相乘, 如式(13)所示。完成相位跳变修复后的信号为仅含码元多普勒的相位连续信号 $D'(mT)$ 可表示为

$$D'(mT) = A_m \exp\left\{j\left[2\pi K_f mT - \varphi_0 + \varphi_{LO} - \psi\right]\right\} + n'(mT). \quad (14)$$

6) 对 $D'(mT)$ 进行频率估计, 并输出速度测量信息。首先利用快速傅里叶算法(FFT)对 $D'(mT)$ 进行频率粗估, 获得 K_{f1} , 并利用频率粗估结果构造数字本振信号 S_n , 与 $D'(mT)$ 信号混频并下抽, 降低采样率和带宽。对下抽后的窄带信号 S_r 进行频率精估获得 K_{f2} 。最终在速度测量时间间隔 t 内, 调制码元多普勒频移估计结果 $K'_f = K_{f1} + K_{f2}$, 再由 $v' = K'_f \cdot c / f_s$, 可解算出相对径向速度估计结果。

3 测速方法的仿真分析

3.1 测速方法仿真参数分析

基于星间相干光通信的通信速率、误码率、多普勒变化范围等主要参数分析, 以及对星间相对速度测量的基本要求, 分析提出测速方法所需的主要仿真参数。

典型卫星激光通信技术验证项目情况^[14]的分析结果表明, 相干光通信的通信速率 f_s 在 Gbit/s 量级, 误码率 E_r 为 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ ($E_r = 10^{-9}$ 对应 BPSK 调制信噪比 R_{SN} 阈值为 12.5 dB 的情况)。

考虑到卫星运行轨道对星间相对运动速度及其变化率的影响: 当两颗星处于同一轨道面时, 一前一后卫星之间的距离变化不大, 相对速度较小; 异轨道面星间链路速度测量受两星间动态效应影响, 两颗卫星相对距离和速度变化较大。参考文献[15]的卫星轨道可知, 星间相对运动速度范围约为 $0 \sim 11.625$ km/s, 速度变化率为 $0 \sim 15.6$ m/s²。

综上所述, 本文测速方法采用的主要仿真参数如下: 采用 BPSK 调制-相干探测体制, 通信码速率为 1 Gbit/s, 误码率为 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 。根据 $K_f = v / (T_s c)$, 在上述条件下码元多普勒频移为 $K_f \leq 38.75$ kHz, 多普勒频移变化率为 $\Delta K_f \leq 52$ Hz/s。速度测量时长(测量时间间隔) $\tau_{\text{interval}} = 1.6$ s, $I(mT)$ 信号采样率为 4 GHz。在进行多普勒频率粗估时, 先将 $D'(mT)$ 下抽至采样频率 $f_{\text{FFT}} = 10$ MHz, 并对其中信号长度为 3.2768 ms 的信号进行 FFT 分析, FFT 点数 $L_{\text{FFT}} = 32768$, 频率分辨率约为 305.2 Hz。考虑到 $\Delta K_f \leq 52$ Hz/s, 计算出的 f_{d1} 为整个 1.6 s 时长范围内信号的频率粗估结果。按照频率粗估结果对另一路 $D'(mT)$ 进行混频下抽, 抽取滤波器带宽设为 400 Hz, 采样率设为 20 kHz。对抽取后的 1.6 s 窄带信号 S_r 采用多项式相位拟合的方法进行频率精估获得 K_{f2} 。

卫星相对匀速运动的基带采样数据如式(10)所示。若进一步考虑速度变化, 则多普勒频移变化率为 ΔK_f 的基带采样数据表示为

$$I(mT) = A_m \exp\left\{j\left\{2\pi f_0 mT - \pi \Delta K_f (mT)^2\right\} - b_k g(mT - kT_s) - \varphi_0 + \varphi_{LO} - \psi\right\} + n(mT). \quad (15)$$

仿真中仅考虑通信链路中加性噪声 $n(t)$ 的影响, 根据文献[16]中加性高斯噪声引起的频率不确定性公式, 可得到加性噪声下的速度测量不确定度克拉美劳 (CR) 下限为

$$\sigma_{\min, v} = \frac{\sqrt{1/R_{SN}}}{2\pi\tau_{\text{interval}}} \times \frac{c}{f_s}. \quad (16)$$

3.2 速度测量仿真

采用上述仿真参数, 对不同相对径向速度 v 、速度变化率 a 和信噪比 R_{SN} , 利用所提方法进行速度测量仿真验证。

图 2 展示了所提测速方法全流程仿真个例。仿真参数为通信码速率 1 Gbit/s, 误码率为 10^{-9} , 星间相对径向速度 $v = 11.625$ km/s (对应多普勒频移 $K_f = 38.750$ kHz), 仿真数据时长为 1.6 s。

如图 2 所示, 其中图 2(a)~(d) 对应 FFT 粗估结果 $K_{f1} = 38.757$ kHz, $K_{f2} = -7.306$ Hz, $K'_f = 38.750$ kHz,

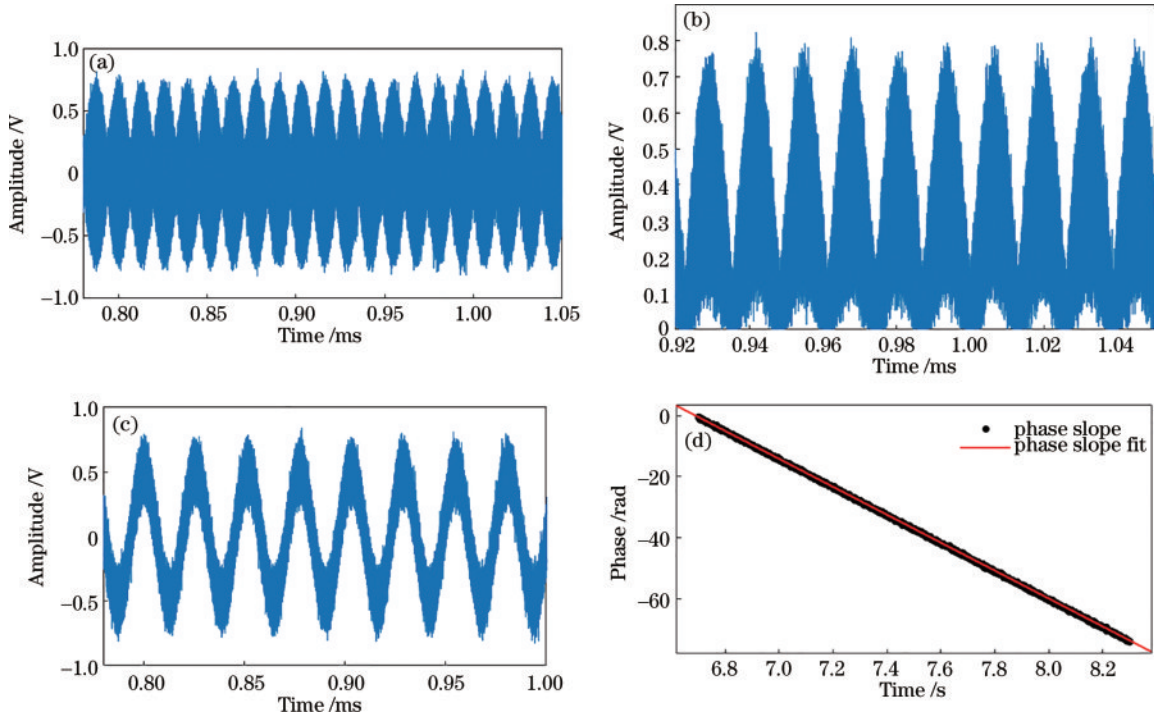


图 2 测速方法全流程仿真个例。(a)基带信号同相分量波形;(b)初步去除跳变波形;(c)相位连续多普勒信号输出;(d)相位线性拟合结果($k_d = 45.9061$)

Fig. 2 A case of simulation of the whole flow of velocity measurement method. (a) Baseband signal in-phase component waveform; (b) initial removal of jump waveforms; (c) phase-continuous Doppler signal output; (d) phase linear fitting results ($k_d = 45.9061$)

测量得到的估计相对径向速度 $v' = 11.625 \text{ km/s}$ 。

图 3 展示了 400 s 时长仿真信号的速度测量误差, 每 1.6 s 进行一次速度测量, 仿真参数如下: 通信码速率为 1 Gbit/s, 误码率为 10^{-9} , 星间相对径向速度 $v = 11.625 \text{ km/s}$ 。统计得到 400 s 内的速度测量不确定度 $\sigma_v = 8.05 \text{ mm/s}$, 根据 (16) 式计算得到该信噪比下速度测量 CR 下限为 7.08 mm/s。仿真结果表明, 所提测速方法为无偏估计, 速度测量不确定度逼近 CR 下限。

图 4(a) 展示了通信码速率为 1 Gbit/s, 误码率为 10^{-9} , 速度变化率为 6.6 m/s^2 (对应的多普勒频移变化

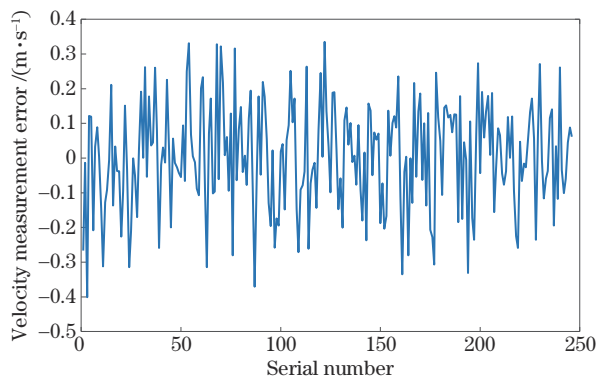


图 3 400 s 时长仿真信号速度测量误差

Fig. 3 Velocity measurement error of 400 s duration simulation signal

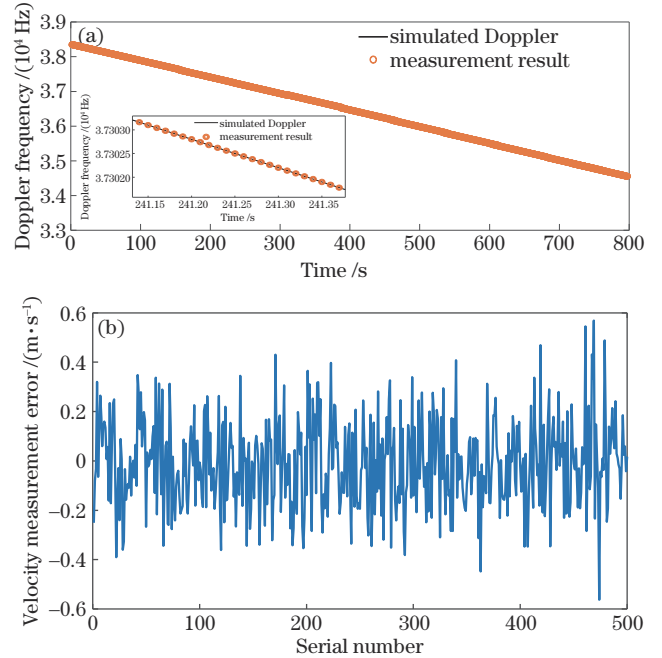


图 4 对径向速度线性变化信号的多普勒频率测量结果和测速误差。(a)多普勒频率测量结果;(b)测速误差

Fig. 4 Doppler frequency measurement results and velocity measurement errors of radial velocity linear change signal. (a) Doppler frequency measurement results; (b) velocity measurement error

率 $\Delta K_r = 22.000 \text{ Hz/s}$ 的径向速度线性变化信号多普勒频率测量结果, 图 4(b) 展示了仿真时长内的测速误

差。仿真信号时长 800 s,速度测量时长 $\tau_{\text{interval}} = 1.6 \text{ s}$ 。多项式相位拟合方法估计的多普勒频移变化率 $\Delta K_f' = 22.001 \text{ Hz/s}$,统计得到仿真时长 800 s 内的速度测量不确定度为 8.02 mm/s。

接下来分别仿真了不同信噪比 R_{SN} 、速度变化率 a 和相对径向速度 v 下的测速精度。通信码速率为 1 Gbit/s,仿真信号时长为 800 s,速度测量时长 $\tau_{\text{interval}} = 1.6 \text{ s}$ 。仿真结果如表 1 所示,所提测速方法在通信信号信噪比为 10.5 dB~12.5 dB,相对径向速度变化范围为 0~11.625 km/s,速度变化率在 0~15.6 m/s² 的情况下,利用时长为 1.6 s 的通信信号,可实现不确定度优于 10.00 mm/s 的速度测量。

表 1 不同信噪比、相对径向速度和速度变化率下速度测量不确定度仿真结果

Table 1 Simulation results of velocity measurement uncertainty under different signal-to-noise ratio, radial velocity and velocity change rate

$a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$R_{\text{SN}} / \text{dB}$	$v / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
0	10.5	11.625	9.23
		11.025	9.30
		10.425	9.24
	11.3	11.625	8.87
		10.825	8.90
		6.425	8.83
		11.025	7.89
6.6	12.5	8.000	7.75
	10.5	0.825	8.02
		-	9.81
		10.7	8.93
		12.5	8.11
12.6	10.9	8.83	
	11.3	8.42	
	11.7	7.92	
15.6	12.1	7.72	
	12.5	7.81	

4 结 论

针对星间链路卫星自主导航和激光通信测速一体化系统对高精度速度测量的需求,本文提出一种基于调制码元多普勒测量的星间相干光通信链路测速方法,采用单程单向的方式,在接收端进行码元符号同步和判决的过程中,利用码元符号同步和判决相位及符号信息,去除基带采样数据中的相位调制信息,获取相位连续的码元多普勒信号,然后对该多普勒信号进行频率分析和速度解算,最终完成星间相对速度的测量。仿真结果表明,该方法可在通信码速率为 1 Gbit/s,误码率为 10^{-9} 情况下,实现 0~11.625 km/s 的相对速度测量,速度测量不确定度优于 10.00 mm/s。

本文所提测速方法是一种无偏速度估计方法,不增加额外的速度测量硬件模块,也不采用双向或双程测量等复杂的测量时序和流程,在完成星间通信的同时,还能实现对卫星相对运动速度的实时高精度测量,降低系统的复杂度,进一步优化了星间激光通信测量一体化系统设计,具有较高的工程应用价值。该方法原理简单,适用于 PSK 调制-相干探测的空间激光通信工作体制,还可应用于其他无线通信系统的速度测量。

参 考 文 献

- [1] Liu X N, Li Y F, Xiang C Y, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147-153, 167.
- [2] 赵馨, 牛俊坡, 刘云清, 等. 导航卫星中激光通信/测距一体化技术及链路特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 060601.
Zhao X, Niu J P, Liu Y Q, et al. Laser communication/ranging integrated technology and link characteristics in navigation satellite system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 060601.
- [3] Gounley R, White R, Gai E. Autonomous satellite navigation by stellar refraction[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1984, 7(2): 129-134.
- [4] 邢强林, 朱宏权, 汪勃, 等. 利用双向通信传输帧同步码测量距离速度钟差频差的方法: CN109660309B[P]. 2021-08-13.
Xing Q, Zhu H, Wang B, et al. Method for measuring distance, speed, clock correction, and frequency difference by utilizing two-way communication transmission frame synchronization code: CN109660309B[P]. 2021-08-13.
- [5] 杨馥, 邱子胜, 李姝欣, 等. 基于伪随机码相位调制和外差探测的高精度激光测速测距系统研究[J]. 飞控与探测, 2019, 2(1): 43-48.
Yang F, Qiu Z S, Li S X, et al. Research on high precision lidar velocity and range measurement system based on the technologies of pseudo-random code phase modulation and heterodyne detection[J]. Flight Control & Detection, 2019, 2(1): 43-48.
- [6] 周东, 许永鑫, 游长江, 等. 一种激光通信探测装置及方法: CN110045384B[P]. 2022-01-11.
Zhou D, Xu Y, You C, et al. Laser communication detection device and method: CN110045384B[P]. 2022-01-11.
- [7] 朱宏权, 邢强林, 傅一文, 等. 基于 OOK 体制的激光统一测控系统设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(11): 1203-1206.
Zhu H Q, Xing Q L, Fu Y W, et al. Design and realization of OOK-based unified laser TT & C system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(11): 1203-1206.
- [8] 许云祥, 许蒙蒙, 孙建锋, 等. 卫星相干光通信测速一体化技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120603.
Xu Y X, Xu M M, Sun J F, et al. Integrated technology

- of communication and velocity measurement in satellite coherent optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120603.
- [9] Xu M M, Sun J F, Zhang B, et al. Two-one-way laser Doppler approach for inter-satellite velocity measurement [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1353-1366.
- [10] 张佳薇, 杨国伟, 毕美华, 等. 一种基于逆向调制器的激光通信和测速系统: CN112787719A[P]. 2021-05-11.
Zhang J, Yang G, Bi M, et al. Laser communication and speed measurement system based on reverse modulator: CN112787719A[P]. 2021-05-11.
- [11] Tapley B D, Watkins M M, Flechtner F, et al. Contributions of GRACE to understanding climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(5): 358-369.
- [12] Abich K, Abramovici A, Amparan B, et al. In-orbit performance of the GRACE follow-on laser ranging interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3): 031101.
- [13] Rüdiger A, Heinzel G, Tröbs M. LISA, the laser interferometer space antenna, requires the ultimate in lasers, clocks, and drag-free control[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [14] 高铎瑞, 谢壮, 马榕, 等. 卫星激光通信发展现状与趋势分析(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(4): 0406001.
Gao D R, Xie Z, Ma R, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406001.
- [15] Ando T, Haraguchi E, Tajima K, et al. Coherent homodyne receiver with a compensator of Doppler shifts for inter orbit optical communication[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7923: 79230J.
- [16] Withers P. Prediction of uncertainties in atmospheric properties measured by radio occultation experiments[J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(1): 58-73.