

应用于分布式空间网络的脉冲超宽带测距技术*

于秀丽¹, 王婧舒¹, 史磊²
(1 北京宇航系统工程研究所 北京 100076;
2 首都航天机械公司 北京 100076)

摘要: 针对分布式空间网络中航天器间的高精度测距需求, 讨论加性高斯白噪声信道下脉冲超宽带测距技术的均方根误差克拉美罗下界, 分析高斯导数脉冲参数对克拉美罗下界的影响, 并比较最大似然距离估计算法的性能限。通过分析星间链路的链路预算, 得到脉冲超宽带测距的测距精度在航天器间距离为 10km 时, 其测距均方根误差下限值可达毫米级。

关键词: 脉冲超宽带; 测距; 分布式空间网络

中图分类号: TN911.23 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)03-0025-05

Using impulse radio ultra-wideband (IR-UWB) ranging technique in distributed space networks

YU Xiuli¹, WANG Jingshu¹, SHI Lei²

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

2. Capital Aerospace Engineering Machinery Company, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper discusses using impulse radio ultra-wideband (IR-UWB) ranging technique to realize high-accuracy inter-spacecraft ranging in future distributed space networks. First, it gives the Cramér-Rao lower bound (CRLB) on root mean square error (RMSE) of IR-UWB-based ranging under inter-spacecraft channels. It also discusses the effects of pulse parameters on CRLB and gives the asymptotic optimum maximum likelihood (ML) range estimation algorithm. Second, it analyzes the IR-UWB-based inter-spacecraft link budget and illustrates its feasibility and high-accuracy ranging performance. In addition, it analyzes and summaries the technical challenges on using IR-UWB technique to future distributed space networks missions.

Key words: Impulse radio ultra-wideband (IR-UWB); Ranging; Distributed space networks

引 言

随着空间科学探索任务愈发复杂多样, 传统依赖大型航天器的空间任务解决方案成本高昂, 而且易受到其生命周期中不确定因素的影响, 难以满足当前日益增长且复杂多变的航天任务需求。分布式空间网络凭借其更高的鲁棒性、更大的灵活性和更强的功能特点成为实现未来对地观测、深空探测等航天任务的重要手段。分布式空间网络主要包含航天器编队飞行网络和分离模块航天器网络^[1-3]。基于分布式空间网络的未来空间任务通常需要在各航天器之间实现高精度的距离测量, 进而联合其它定位信息在网络中确定各个航天器位置, 实现特定网络构型。空间分布式网络中航天器间的位置测量一般采用基于窄带连续波信号或激光信号的测距技术。基于窄带连续波信号的测距技术一般需要高信噪比实现高精度测距, 而基于激光信号的测距技术对航天器间的光束对准精度有着非常高的要求^[4]。

脉冲超宽带 (IR-UWB) 测距技术使用纳秒或亚纳秒时间宽度的脉冲信号完成通信和定位, 具有测距/测角精度高、数据传输速率快、低功耗、抗多径、穿透能力强等特点^[5,6]。由于脉冲超宽带测距技术能够实现高精度的距离测量和角度测量, 该技术在通信和定位领域有广阔的市场前景, 已广泛应用于室

*基金项目: 国家自然科学基金 (51505036)

收稿日期: 2020-03-17 收修改稿日期: 2020-05-27

内实时定位、主动式射频识别定位等民用领域和雷达、成像、战术作战等军用领域。IEEE 802.15.4a 标准^[7]采用脉冲超宽带信号实现中、低速率通信和高精度定位（1 米以下）的有效复合，适用于物联网、无线传感器网络等应用场景。正在制定的 IEEE 802.15.4f 标准也准备采用脉冲超宽带测距技术实现主动式射频识别节点的高精度实时定位^[8]。波音公司和美国国家航空航天局肯尼迪航天中心采用超宽带实时定位系统对其工具和数以千计的用于支持国际空间站的部件进行跟踪。在脉冲超宽带测距技术逐渐发展成熟的基础上，航天领域也开展了脉冲超宽带测距技术在航天领域应用的研究，主要包括近距离星间通信、定位复合系统和行星表面通信、定位复合系统^[3]。CCSDS 880.0-G-1 标准对空间任务中无线网络需求和标准进行了分析，提出了使用脉冲超宽带和到达时间差定位技术来实现科学样本跟踪的任务设想和建议^[9]。

本文首先分析星际链路在加性高斯白噪声（AWGN）信道下脉冲超宽带测距的克拉美罗性能限、脉冲参数的影响，然后分析了最大似然估计测距的性能限。最后，通过航天器间链路预算得到基于脉冲超宽带测距技术的性能，并讨论了空间网络中通信测距复合技术难点。

1 脉冲超宽带测距性能分析

无线电测距可以依靠测量到达时刻（ToA）或测量接收信号强度（RSS）两种测距方法完成，而基于 ToA 的测距方法可以有效利用脉冲超宽带信号大带宽的特点实现高精度测距^[10,11]。因此，本节对脉冲超宽带信号 ToA 的估计精度进行分析，给出理论极限和逼近该极限的最优估计算法。

假设星际链路为加性高斯白噪声信道，航天器接收信号 $r(t)$ 可表示为

$$r(t) = \sqrt{E_p} p(t - \tau) + n(t) \quad (1)$$

其中， $p(t)$ 为超宽带脉冲信号， E_p 为接收脉冲的平均能量， $n(t)$ 为零均值且双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声信号， τ 为接收信号到达时刻。

1.1 脉冲超宽带测距 CRLB

假设分布式空间网络中各个航天器间理想同步，不存在时钟误差，脉冲超宽带信号 ToA 无偏估计值 \hat{t} 的均方根误差（RMSE）满足

$$\text{RMSE}_{\hat{t}} = \sqrt{V\{\hat{t}\}} \geq \text{CRLB}_{\hat{t}} \quad (2)$$

其中， $V\{\cdot\}$ 表示计算方差的函数， $\text{CRLB}_{\hat{t}}$ 为估计值 \hat{t} 的均方根误差极限^[10]，克拉美罗下界 CRLB（Cramér-Rao lower Bound）为

$$\text{CRLB}_{\hat{t}} = \sqrt{\frac{N_0/2}{(2\pi)^2 E_p \beta^2}} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi} \sqrt{\text{SNR}} \beta} \quad (3)$$

其中， $\text{SNR} = E_p / N_0$ 表示接收信噪比，当使用 N 个脉冲进行测距时， $\text{SNR} = NE_p / N_0$ ； β 为信号 $p(t)$ 的有效带宽，可表示为

$$\beta = \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f^2 |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df} \right)^{1/2} \quad (4)$$

其中， $S(f)$ 为脉冲超宽带信号 $p(t)$ 的傅里叶变换。

因此，脉冲超宽带测距均方根误差下限 CRLB_d 可以表示为

$$\text{CRLB}_d = c \cdot \text{CRLB}_{\hat{t}} = \frac{c}{2\sqrt{2\pi} \sqrt{\text{SNR}} \beta} \quad (5)$$

其中， c 为无线电信号在自由空间中的传播速度。 CRLB_d 受两个参数的影响：增大接收信噪比 SNR 或信号有效带宽 β 都可以提高测距精度，而这两个参数都和脉冲的形状有关。

1.2 脉冲形状对 CRLB 的影响分析

本节分析脉冲形状对测距均方根误差克拉美罗下界的影响，脉冲超宽带信号多数采用高斯导数脉冲

形式，而基本高斯脉冲 $p_0(t)$ 的时域波形可以表示为

$$p_0(t) = \exp\left(-2\pi \frac{t^2}{\tau_p^2}\right) \tag{6}$$

其中， τ_p 为脉冲时域宽度控制参数，而高斯第 n 阶导数脉冲的时域波形可以表示为^[9]

$$p_n(t) = p_0^{(n)}(t) \sqrt{\frac{(n-1)!}{(2n-1)! \pi^n \tau_p^{(1-2n)}}, n=1,2,3\cdots \tag{7}$$

其中， $p_0^{(n)}(t)$ 为基本高斯脉冲 $p_0(t)$ 对时间 t 求 n 阶导数的结果。通过计算可以得出高斯各阶导数脉冲 $p_n(t)$ 的能量都是相同的，且高斯第 n 阶导数脉冲的有效带宽可以表示为

$$\beta = \sqrt{\frac{2n+1}{2\pi\tau_p^2}}, n=1,2,3\cdots \tag{8}$$

因此，增加导数阶次 n 或减小脉冲时域宽度控制参数 τ_p 都可以增大有效带宽 β ，进而提高测距精度。对于相同导数阶次 n ，脉冲宽度控制参数分别为 τ_{p1} 和 τ_{p2} 的两种高斯导数脉冲信号来讲，其测距均方根误差的克拉美罗下界之比为

$$\frac{\text{CRLB}_{d,n+1}}{\text{CRLB}_{d,n}} = \frac{\tau_{p1}}{\tau_{p2}} \tag{9}$$

即测距均方根误差的克拉美罗下界正比于脉冲时域宽度。另一方面，对于相同脉冲宽度 τ_p ，脉冲导数阶数分别为 $n+1$ 和 n 的两种高斯导数脉冲来讲，其测距均方根误差的克拉美罗下界之比为

$$\frac{\text{CRLB}_{d,n+1}}{\text{CRLB}_{d,n}} = \sqrt{\frac{2n+1}{2n+3}} \tag{10}$$

即采用更高阶的高斯导数脉冲可以减小测距均方根误差，随着导数阶数 n 的增加，该式的比值趋近于 1，即提高脉冲导数阶次 n 带来的测距精度提升的幅度将会随着 n 的增大而越来越小。

图 1 显示了三种不同高斯导数脉冲的时域波形（左）、能量谱密度（中）和测距均方根误差克拉美罗下界随接收信噪比的变化（右）。分析图 1 可知，增加导数阶数 n 可以增大带宽并且提高测距精度，减小脉冲时域宽度控制参数 τ_p 同样可以增大带宽并且提高测距精度。

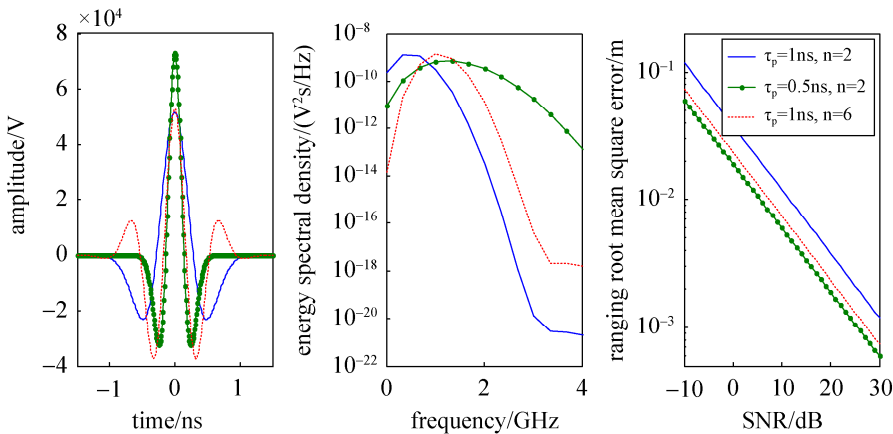


图 1 高斯导数脉冲的时域波形、能量谱密度及其测距均方根误差克拉美罗下界
Fig. 1 The time domain waveform, energy spectral density, and the CRLB on RMSE

1.3 最大似然估计及门限

到达时刻 τ 的估计是一个典型的非线性参数估计问题，最大似然（ML）估计算法可以渐进逼近克拉美罗下界，即最大似然估计算法可以在高信噪比条件下达到克拉美罗下界。最大似然估计算法可以使

用匹配滤波 (MF) 接收机实现^[10]。假设接收机预先知道脉冲信号 $p(t)$ 的形状, 接收信号 $r(t)$ 首先通过一个匹配滤波器, 该滤波器的冲激响应函数为 $p(-t)$, 滤波输出信号 $u(t)$ 经过平方后得到信号 $v(t)$, 而 $v(t)$ 的最大值就对应估计的时延 $\hat{\tau}$ 。基于匹配滤波器的时延估计表示为

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} \left(\int r(t) p(t - \tau) dt \right)^2 \quad (11)$$

最大似然估计算法所能达到的测距均方根误差能够使用 Ziv-Zakai 下界 ZZLB (Ziv-Zakai lower bound) 进行近似^[12], ZZLB_d 经过推导可以表示为^[10]

$$\text{ZZLB}_d = \frac{1}{T_{\text{obs}}} \int_0^{T_{\text{obs}}} \xi (T_{\text{obs}} - \xi) Q(\sqrt{\text{SNR}(1 - R_p(\xi))}) d\xi \quad (12)$$

其中, T_{obs} 为观察时长, $R_p(\xi)$ 为接收脉冲 $p(t)$ 的自相关函数, 它和 Q 函数可以分别表示为

$$R_p(\xi) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t + \xi) p(t) d\xi \quad (13)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} e^{-t^2/2} dt \quad (14)$$

图 3 给出了测距均方根误差的 ZZLB 和 CRLB, 仿真使用时域宽度控制参数 $\tau_p = 0.5\text{ns}$ 的二阶导数高斯脉冲信号。从图 3 可以看出, 使用最大似然估计算法的测距均方根误差存在阈值效应: 在高信噪比 $\text{SNR} > 15\text{dB}$ 条件下, 最大似然估计算法的测距均方根误差可以达到克拉美罗下界; 在低信噪比条件下, 最大似然估计算法的测距性能不能再由克拉美罗下界进行评价。因此, 最大似然估计算法是渐进最优的测距算法。

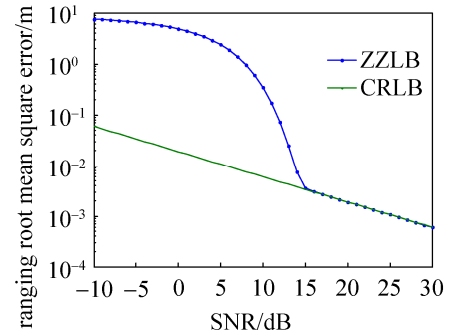


图 3 最大似然估计的测距均方根误差 ZZLB 和 CRLB 比较

Fig. 3 Comparison for ZZLB and CRLB on RMSE of ML estimation

2 星间链路中脉冲超宽带测距分析

2.1 空间网络测距链路分析

基于脉冲超宽带测距技术的分布式空间网络星际链路预算, 如表 1 所示。脉冲选择为高斯二阶导数脉冲, 脉冲中心频率为 $f_c = 0.89286\text{GHz}$, 峰值频率为 $f_p = 0.33557\text{GHz}$, 脉冲-3dB 带宽为 $B_{-3\text{dB}} = 0.70598\text{GHz}$, 脉冲-10dB 带宽为 $B_{-10\text{dB}} = 1.2043\text{GHz}$, 脉冲幅度为 $A = 5\text{V}$, 宽度为 $\tau_p = 1\text{ns}$, 发送脉冲能量为^[5],

$$E_{p,t} = A^2 \cdot (3\tau_p / 8) = 9.375 \times 10^{-5} \text{V}^2 \cdot \text{s} \quad (15)$$

每符号包含脉冲个数 $N = 16$, 计算发送符号能量为 $E_{s,t}^{\text{dB}} = 10 \lg(N \cdot E_{p,t}) = -68.24\text{dB}$ 。航天器间距离为 10km , 自由空间损耗 $L_p^{\text{dB}} = 20 \lg(c / (4\pi d f_c)) = -111.45\text{dB}$ 。考虑其他损耗 $L_o^{\text{dB}} = 3\text{dB}$, 接收天线增益 $G_r^{\text{dB}} = 3\text{dB}$, 则接收符号能量为

$$E_{s,r}^{\text{dB}} = E_{s,t}^{\text{dB}} + G_t^{\text{dB}} + L_p^{\text{dB}} + L_o^{\text{dB}} + G_r^{\text{dB}} = -176.69 \text{dB} \quad (16)$$

设噪声指数 $NF^{\text{dB}} = 5\text{dB}$, 噪声参考温度 $T_0 = 290\text{K}$, 噪声温度为 $T_s = T_0(NF^{\text{dB}} - 1) = 627\text{K}$, 得到噪声功率谱密度 $N_0^{\text{dB}} = 10 \lg(kT_s) = -200.6 \text{dB}$, 其中 $k = 1.39 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 为玻尔兹曼常数。根据上述参数可获得信噪比 $\text{SNR}^{\text{dB}} = E_{s,r}^{\text{dB}} - N_0^{\text{dB}} = 23.91\text{dB}$ 。根据式 (5) 可得测距均方根误

表 1 脉冲超宽带分布式空间网络星际链路预算

Table 1 Link budget for UWB-based distributed space networks

参数	符号	数值	单位
发送脉冲能量	$E_{p,t}$	9.375×10^{-5}	$\text{V}^2 \cdot \text{s}$
脉冲有效带宽	β	0.89206	GHz
发送符号能量	$E_{s,t}^{\text{dB}}$	-68.24	dB
发射天线增益	G_t^{dB}	3	dB
自由空间损耗	L_p^{dB}	-111.45	dB
其他损耗	L_o^{dB}	3	dB
接收天线增益	G_r^{dB}	3	dB
接收符号能量	$E_{s,r}^{\text{dB}}$	-176.69	dB
噪声功率谱密度	N_0^{dB}	-200.6	dB
信噪比	SNR^{dB}	23.91	dB

差下限值达到了毫米量级, $CRLB_r=2.41 \times 10^{-3} \text{m}$ 。因此, 基于脉冲超宽带测距技术的航天器间测距具有非常高的精度, 能够满足未来空间分布式空间网络任务的需要。

2.2 应用分析讨论

脉冲超宽带测距技术在测距和通信方面具有独特的技术优势, 同时也存在技术难点: 一方面, 脉冲超宽带信号的超宽带宽对通信、测距设备的采样速率和信号处理器件性能提出了很高的要求, 非相干接收技术可降低对采样速率的约束, 但同时也降低了通信性能和测距性能^[10]; 另一方面, 脉冲超宽带信号的大带宽特点可能会使其与带内窄带信号产生互干扰, 需要对脉冲超宽带信号进行波形设计或载波调制从而有效避免干扰问题的发生^[13]。在有效解决干扰问题的情况下, 分布式空间网络中使用的超宽带信号将不受目前地面发射功率的限制^[14], 从而大幅度增加通信、测距距离, 满足未来分布式空间网络任务的需要。

3 结束语

针对星际链路下脉冲超宽带测距技术, 本文分析了 AWGN 信道下的 CRLB 性能限和最大似然估计测距的性能限, 并分析了航天器间链路预算及其脉冲超宽带测距性能。结果表明, 脉冲超宽带测距技术应用于分布式空间网络可实现航天器间高精度测距, 并且能够和通信进行有效复合。

参考文献

- [1] SHAH N, BROWN O C. Fractionated satellites: Changing the future of risk and opportunity for space systems[J]. High Frontier, 2008, 5(1): 29–36.
- [2] LIU H, LIANG W. Development of DAPRA's F6 program[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(2): 92–98.
- [3] 陈庆, 张锦绣, 曹喜滨. 集群航天器网络发展现状与关键技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(4): 1–7.
CHEN Qing, ZHANG Jinxiu, CAO Xibin. Development status and key technology of spacecraft cluster network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(4): 1–7.
- [4] ZHU J G, WANG Y, XU Z M. Applied research on ultra-wideband impule radio technology in spacecraft short-range formation flying[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(3): 9–16.
- [5] BENEDETTO M G D, GIANCOLA G. Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals[M]. NJ: Prentice Hall PTR, 2004.
- [6] SAHINOGLU Z, GEZICI S, GUVENC I. Ultra-Wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols[M]. NY: Cambridge Univ. Press, 2008.
- [7] Amendment to IEEE Std. 802.15.4, IEEE Std. 802.15.4a-2007[S]. IEEE Computer Society, 2007:[2007-08-31].
- [8] IEEE 802.15 WPAN Task Group 4f (TG4f) [EB/OL]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub.TG4f.html>
- [9] CCSDS 880.0-G-1. Wireless Network Communications Overview for Space Mission Operations. Report Concerning Space Data System Standards[S]. Green Book. Issue 1. Washington, D.C.: CCSDS, 2010.
- [10] DARDARI D, CONTI A, FERNER U. Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments[J]. Proc. IEEE (Special Issue on UWB Technology and Emerging Applications), 2009, 97(2): 404–426.
- [11] BARTOLETTI B, DAI W, CONTI A. A mathematical model for wideband ranging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2015, 9(2): 216–228.
- [12] SADLER B M, HUANG L, XU Z. Ziv-Zakai time delay estimation bound for ultra-wideband signals[C]. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Process. (ICASSP), Honolulu, Hawaii, 2007, 3: 549–552.
- [13] GEZICI S, POOR H V. Position estimation via ultra-wide-band signals[J]. Proc. IEEE (Special Issue on UWB Technology and Emerging Applications), 2009, 97(2): 386–403.
- [14] Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems[R]. Ultra-Wideband (UWB) First Report and Order, 2002.

[作者简介]

于秀丽 1978年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为空间飞行器无线通信。

王婧舒 1986年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电气系统总体设计。

史磊 1981年生, 大专, 技师, 主要研究方向为遥测遥控。