

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.016

“天问一号”微波着陆雷达高收发隔离系统设计方法

李拴劳, 牛文博, 张爱军, 王振西, 刘瑞冬, 贾建超, 王 科

(西安空间无线电技术研究所, 西安 710100)

摘要:“天问一号”微波着陆雷达是探测器进入、下降与着陆(Entry, descent and landing, EDL)阶段的关键单机, 采用了线性调频连续波(Linear frequency modulation continuous wave, LFMCW)体制, 如何有效抑制 LFMCW 雷达接收回波中耦合的直波泄露信号一直是提高雷达性能的关键问题。本文从雷达系统设计角度出发, 在满足系统轻小型化要求的前提下, 提出了高隔离度天线设计、接收机中频输出信号滤波设计以及数字信号处理中泄露信号抑制相结合的方法, 有效地解决了 LFMCW 雷达直波泄露的问题。通过分析外场直升机校飞试验实测数据, 证明采用上述方法后, 可大幅抑制直波泄露信号, 并可将直波泄露信号携带的相位噪声抑制 10~15 dB。

关键词:微波着陆雷达; 线性调频连续波; 隔离度; 泄露抑制

中图分类号: TN958.94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0097-05

Highly Isolation Design of Microwave Landing Radar for “Tianwen-1” Mission

LI Shuanlao, NIU Wenbo, ZHANG Aijun, WANG Zhenxi, LIU Ruidong, JIA Jianchao, WANG Ke

(Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: The microwave landing radar is a linear frequency modulation continuous wave (LFMCW) radar, which is a key instrument for “Tianwen-1” spacecraft during its entry, descent and landing (EDL) phase. Signal leakage has become the key factor that restricts the performance of LFMCW radar. In order to satisfy the requirement of small, light and high isolation radar system, this paper combines certain methods including a high isolation antenna design, intermediate frequency filtering and leakage suppression in digital signal processing. It is proved by a helicopter test that these methods can filter out the leakage and reduce the phase noise of leakage signal about 10—15 dB by analyzing data.

Key words: microwave landing radar; linear frequency modulation continuous wave (LFMCW); isolation; leakage suppression

中国首次火星探测任务“天问一号”探测器已于 2020 年 7 月 23 日成功发射, 目标是实现集绕、落、巡于一体的全面探测。“天问一号”探测器系统由环绕器和着陆巡视器组成, 着陆巡视器由进入舱和火星车两部分组成。对于火星着陆探测任务而言, 进入、下降与着陆(Entry, descent and landing, EDL)阶段是最为关键的阶段, 直接决定着整个探测任务的成败^[1]。火星的 EDL 过程一般分为以下

几个阶段: 着陆巡视器与环绕器分离后至火星大气进入前的阶段、火星进入气动减速阶段、降落伞减速段和动力下降段。微波着陆雷达在降落伞减速段和动力下降段为着陆巡视器导航制导与控制(Guidance, navigation and control, GNC)系统提供相对火星表面的距离和速度信息, 是实现安全软着陆的重要保障。

由于调频连续波(Frequency modulation con-

收稿日期: 2021-05-09; **修订日期:** 2021-06-10

通信作者: 李拴劳, 男, 工程师, E-mail: lishuanlao@163.com。

引用格式: 李拴劳, 牛文博, 张爱军, 等. “天问一号”微波着陆雷达高收发隔离系统设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 97-101. LI Shuanlao, NIU Wenbo, ZHANG Aijun, et al. Highly isolation design of microwave landing radar for “Tianwen-1” mission[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 97-101.

tinuous wave, FMCW)雷达不存在距离盲区,可以满足“天问一号”探测器对超近距离进行高精度测距测速的要求,同时具备易于实现小型化、峰值功率低和分辨率高等优点,因此“天问一号”微波着陆雷达采用了调频连续波体制。但由于调频连续波雷达受到连续波雷达体制的限制,接收信号的同时也在发射信号,因此雷达发射信号不可避免地和回波信号同时进入接收机。当系统的收发链路隔离度不够时,会导致发射信号泄漏到接收链路中的功率过大,造成一系列严重后果:(1)泄漏信号功率过大会降低接收机的灵敏度,甚至引起接收机阻塞;(2)泄漏信号带来的噪声边带可能会淹没相对较小的接收信号;(3)泄漏信号在接收链路引起的交调失真、互调失真等非线性效应会严重影响接收机的性能,而且这些效应在接收链路中很难被消除;(4)对于雷达系统,发射信号泄漏到接收链路中可能会产生虚假信号^[2-3]。因此如何有效地抑制调频连续波雷达接收回波中耦合的泄漏信号一直是提高调频连续波雷达性能的关键问题。

1 微波着陆雷达系统设计

微波着陆雷达在火星大气进入过程中加电,处于待机状态,在此阶段控制单元和恒温晶振开始加电,晶振开始预热和稳定,以备雷达工作后可以为系统提供稳定的频率源;在距火星表面约6.2 km高度时,抛除防热大底,微波着陆雷达转入工作模式,开始发射和接收电磁波,并通过对回波的实时处理得到波束向的距离和速度信息提供给探测器,此后连续提供距离和速度信息直至距火星表面5 m。“天问一号”探测器着陆示意图如图1所示。

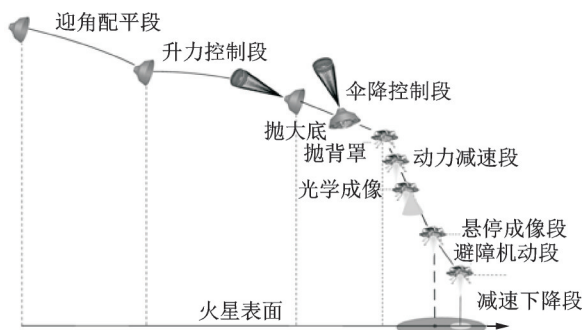


图1 “天问一号”探测器着陆示意图

Fig.1 EDL illustration of “Tianwen-1” mission

微波着陆雷达的主要技术指标如表1所示。

微波着陆雷达配置了4个波束的雷达天线,波束1与进入舱本体机械坐标系X轴平行且反向,波束2、3、4与波束1呈45°夹角,波束2、3、4在进入舱本体机械坐标系YZ平面的投影两两间夹角为120°,波束天线指向及安装示意图如图2所示。微波着陆雷达天线安装示意图如图3所示。

表1 微波着陆雷达主要技术指标

Table 1 Summary of critical radar requirement

序号	项目	技术指标
1	波束数量	4
2	作用距离	14 km~4 m
3	速度范围	-100~160 m/s
4	最大入射角	60°
5	测距精度	$\max(0.2\text{ m}, 0.32\%R) / \cos\theta$
6	测速精度	$\max(0.04\text{ m/s}, 0.28\%(V \cos\beta - 3) + 0.04)(1 + \sin\beta)$

注:R为波束向距离;V为波束向速度; θ 为波束入射角; β 为波束向与合速度方向夹角。

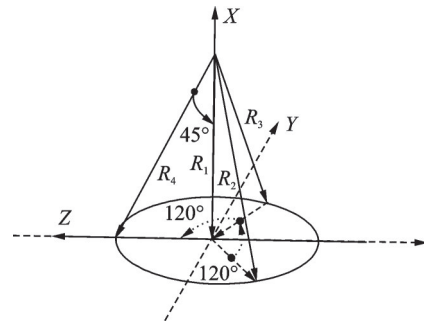


图2 微波着陆雷达天线指向

Fig.2 Observation geometry of radar

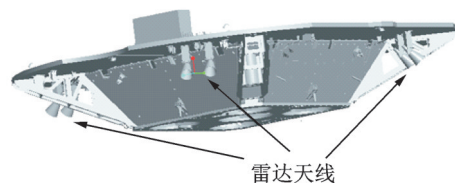


图3 微波着陆雷达天线安装示意图

Fig.3 Configuration of radar antenna

2 系统高隔离度设计方法

2.1 高隔离度收发天线设计

根据天线数量,调频连续波雷达分为单天线和双天线两种^[4],单天线调频连续波雷达在体积、重量和成本上有优势,通常采用环形隔离器来解决收发隔离问题,但目前隔环形器的隔离水平只能达到30~40 dB^[5],无法满足系统的隔离度指标要求。文献[4-7]介绍了使用射频对消的方法来提高系统的隔离度,可以在系统自身隔离度的基础上提高25~40 dB,但是要增加额外的用于对消的硬件产品,不利于系统的轻型化和低成本设计,且隔离度依然不满足指标要求。因此微波着陆雷达在系统设计时采用了双天线的方式,天线形式为光壁喇叭天线,通过优化天线旁瓣设计,使得天线旁瓣低于-20 dB,同时调整天线的布局,最终收发天线间隔离度可达100 dB,满足系统指标要求。喇叭天线实物如图4所示,其电性能如图5所示。



图4 喇叭天线实物图

Fig.4 Hardware of horn antenna

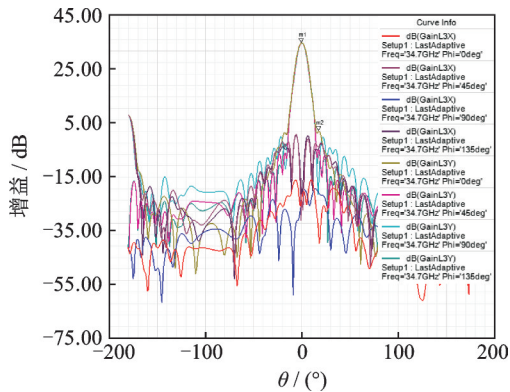


图5 喇叭天线增益方向图

Fig.5 Horn antenna pattern

2.2 接收机中频信号滤波设计

由于微波着陆雷达刚开始工作时,着陆巡视器相对于火星表面的速度较大,因此回波的距离-速度耦合比较严重,系统设计时使用对称调频的三角调频连续波来解距离-速度耦合,可同时测量得到距离和速度。在测量运动目标的应用场景中,三角调频连续波雷达系统的发射信号与回波信号的时频图,以及发射信号与回波信号产生的差频信号的时频图如图6所示^[8]。

由三角调频连续波信号的时频图可知,回波信号相对发射信号在时域上存在一个延迟,其差频信号频率由目标距离的差频和目标速度带来的多普

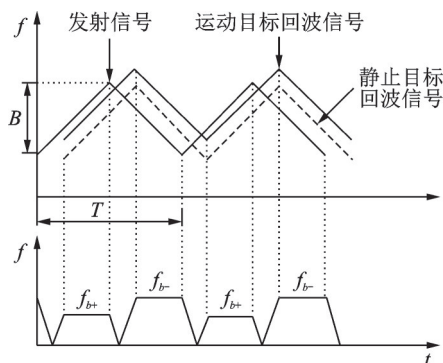


图6 三角调频连续波信号时频图

Fig.6 Triangle modulation continuous waveform

勒频移 f_d 两部分组成,在三角调频连续波信号的正扫频和负扫频时间段可得到不同的差频信号,定义差频信号在正扫频段的频率为 f_{b+} ,在负扫频段的频率为 f_{b-} ,则其表达式如下

$$f_{b+} = f_{b0} - f_d \quad (1)$$

$$f_{b-} = f_{b0} + f_d \quad (2)$$

式中 f_{b0} 为目标与雷达天线相对静止时的差频信号的中心频率,根据图6中所含的三角关系可知

$$f_{b0} = \frac{4BR}{cT} \quad (3)$$

式中: B 为发射信号的带宽; T 为三角波调频连续波信号的调制周期; c 为电磁波在测试环境中的传播速度; R 为目标到雷达天线的距离。

由多普勒效应的原理可以得到多普勒频移 f_d 的表达式为

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (4)$$

式中: v 为目标相对雷达天线视线方向的速度; λ 为雷达发射电磁波信号的波长。将式(3~4)代入式(1~2)可得

$$f_{b+} = \frac{4BR}{cT} - \frac{2v}{\lambda} \quad (5)$$

$$f_{b-} = \frac{4BR}{cT} + \frac{2v}{\lambda} \quad (6)$$

对于连续波体制雷达而言,采用同时收发的工作方式,接收机接收的发射直波泄露信号较大,而在远距时目标的回波信号相对较弱,二者在时域同时存在,若不对泄露信号进行处理,则会影响目标回波的正常检测。由于泄露信号可视为距离为0、速度为0的目标回波,因此其差频信号解调到基带后为零频,而真实目标具有一定的距离和速度,其差频信号一般不为零频。因此可利用泄露信号与目标回波信号在频域的分布特性差别进行频域滤波,对滤波后的信号再进行放大并输出到数字电路进行后续采集和处理。这样可以在接收机输出的中频回波信号中有效地抑制泄露信号,避免在对目标回波信号放大时,将泄露信号一同放大,导致后端中频放大链路饱和。同时在对泄露信号强目标进行抑制后,可以将远距离弱小目标回波信号尽可能地放大,进而提高远距离弱小目标的检测能力,有效提升雷达的作用距离。

2.3 数字信号处理中泄露信号抑制

通过接收机中频信号滤波技术可以有效抑制泄露信号,但对泄露信号携带的相位噪声抑制效果有限,这主要是因为中频信号滤波器的抑制带宽一般比较窄,以免将正常目标的回波信号滤掉,因此无法抑制偏离载频较远处的相位噪声。当前LFMCW雷达一般是在频域上利用快速傅里叶变

换(Fast Fourier transform, FFT)技术测量差频频率^[9],假定第 n 个正负调频周期的回波信号分别为 $s_{\text{dechirp}}^+(t, n)$ 和 $s_{\text{dechirp}}^-(t, n)$,则FFT和非相参积累处理可以表示为

$$S_{\text{dechirp}}^+(f) = \sum_{n=1}^N |\text{FFT}(s_{\text{dechirp}}^+(t, n))| \quad (7)$$

$$S_{\text{dechirp}}^-(f) = \sum_{n=1}^N |\text{FFT}(s_{\text{dechirp}}^-(t, n))| \quad (8)$$

正负调频周期的回波信号分别进行数字下变频、FFT和非相参积累处理后的回波信号仿真结果如图7所示。可见直流泄露残留的相噪仍然较大,且分布频谱较宽。此时,泄露信号的相噪首先将降低信噪比,导致估计精度下降,同时由于频谱分布不平坦,还将导致地面回波的形状发生改变,从而产生噪声估计偏差。因此,需要对残留的泄露信号的相噪进行进一步的抑制处理,方法如下:在正调频周期,由于回波差频频率为负,因此在正频率频谱中仅有直流泄露而无目标回波;而在负调频周期,由于回波差频频率为正,因此在负频率频谱中仅有直流泄露而无目标回波。因此,直流泄露的抑制方式是利用正调频周期的回波频谱去对负调频周期的回波频谱,可表示为

$$S(f) = |S_{\text{dechirp}}^+(f) - S_{\text{dechirp}}^-(f)| \quad (9)$$

式中 $S(f)$ 为对消后的回波频谱,如图8所示,可以看到对消后直流分量已经小于回波信号,同时直流

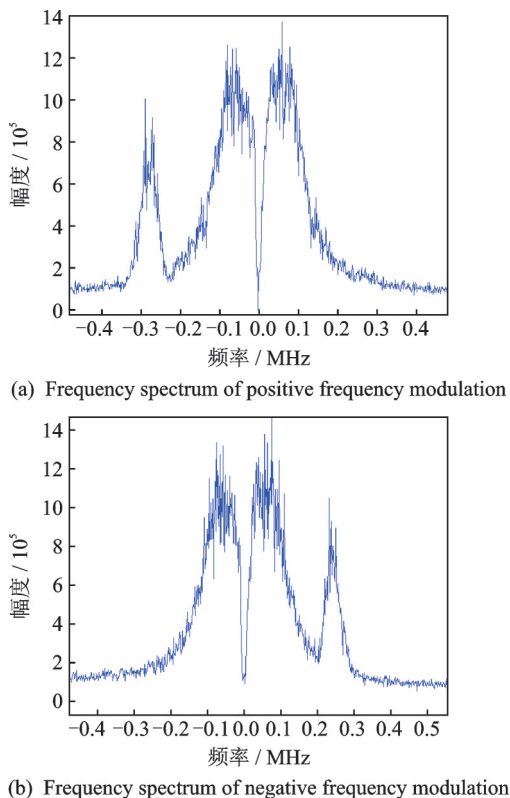


图7 泄露信号抑制前的回波频谱

Fig.7 Frequency spectrum before leakage suppression

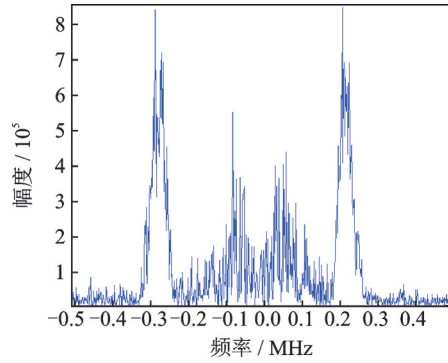


图8 泄露信号抑制后的回波频谱

Fig.8 Frequency spectrum after leakage suppression

分量造成的地面回波形变也得到减轻。因此通过这种方法在数字信号处理中对泄露信号进行抑制,可有效提升雷达的信噪比以及测量精度。

3 试验验证

微波着陆雷达为了验证在远距离、真实环境下测距和测速的功能和性能,参考国外火星探测着陆雷达的地面测试^[10-11],采用直升机在敦煌进行了校飞试验。敦煌有大面积的戈壁滩和沙漠环境,地表植被稀少,最为接近火星表面的环境。微波着陆雷达天线及电子设备均安装于飞机机腹,同时每个波束方向安装1台激光测距仪用于对测距精度进行标定和验证,安装有1台全球定位系统(Global positioning system, GPS)组合惯导用于对测速精度进行验证。微波着陆雷达机载校飞试验现场照片如图9所示,微波着陆雷达在校飞试验过程中的距离和速度测量曲线如图10所示。可见微波着陆雷达从直升机起飞到降落,均可正确的测量距离和速度,远距离时也可稳定连续测量,且测量结果和激光测距仪测距结果及GPS测速结果一致性高,测量精度较高。选取其中一帧的原始回波数据进行分析,其归一化频谱如图11所示,图中零频处的凹陷即为在接收机输出中频信号中进行泄露抑制的效果,再通过数字信号处理时的泄露抑制,可将泄露信号携带的相位噪声进一步抑制10~15 dB左右,有效提升了微波着陆雷达的性能。



图9 微波着陆雷达直升机校飞试验图

Fig.9 Radar distribution on the helicopter

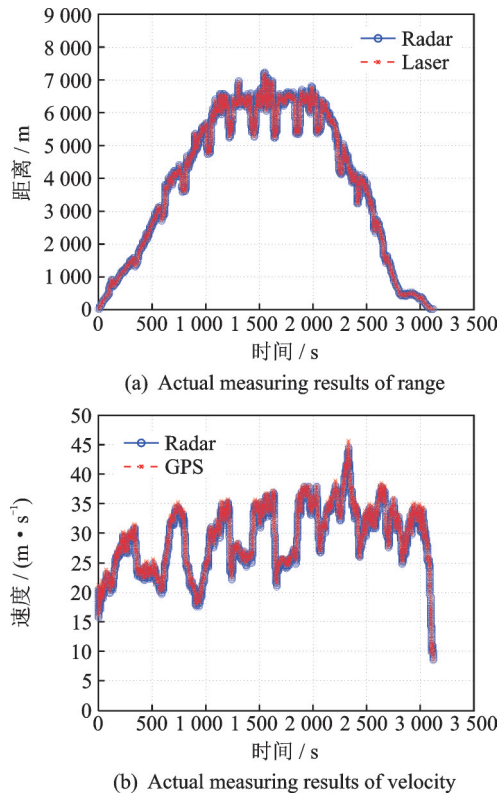


图10 微波着陆雷达校飞试验测量结果

Fig.10 Radar measurements during helicopter test

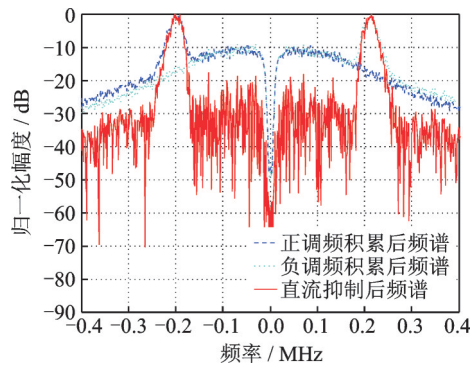


图11 真实目标回波归一化频谱图

Fig.11 Normalized spectrum of real target

4 结 论

本文详细介绍了“天问一号”微波着陆雷达提高收发隔离,抑制直波泄露信号的系统设计方法。文中给出的试验结果说明了该方法的有效性,可为其他对轻小型化和隔离度要求较高的LFMCW雷达设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李爽,江秀强.火星EDL导航、制导与控制方案综述与启示[J].宇航学报,2016,37(5):499-511.
LI Shuang, JIANG Xiuqiang. Summary and enlightenment of GNC schemes for mars entry, descent and landing[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(5): 499-511.
- [2] 马世能.单天线FMCW雷达射频收发前端高隔离技

术研究[D].成都:电子科技大学,2014.

MA Shineng. Research on high isolation techniques of transceiver front-end in single antenna FMCW RADARS [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

- [3] 谭瑗军,谭泽富,燕曼君.调频连续波雷达泄漏信号抑制技术综述[J].电讯技术,2019,59(11):1364-1370.
TAN Aijun, TAN Zefu, YAN Manjun. Summarization of leakage signal suppression technology for frequency modulated continuous wave radar[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(11):1364-1370.
- [4] 陈少华,王冬华,祁全,等.一种基于FPGA的自适应射频对消方法[J].火控雷达技术,2019,48(2):33-37.
CHEN Shaohua, WANG Donghua, QI Quan, et al. An FPGA-based adaptive RF cancellation method[J]. Fire Control Radar Technology, 2019, 48(2):33-37.
- [5] 冯健康,黄根全,谢敏.连续波雷达直波泄露抑制技术研究[J].火控雷达技术,2015,44(2):9-12.
FENG Jiankang, HUANG Genquan, XIE Min. Study on technology for suppression of CW radar direct wave leakage[J]. Fire Control Radar Technology, 2015, 44(2): 9-12.
- [6] 张鹏.FMCW雷达射频对消系统的研究与基带设计[D].成都:电子科技大学,2015.
ZHANG Peng. Research on FMCW radar RF cancelling system and baseband design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [7] 丁满来,梁兴东,唐跃,等.一种新型FMCW雷达射频对消方法[J].微波学报,2018,34(5):54-57.
DING Manlai, LIANG Xingdong, TANG Li, et al. Research on a novel RF cancellation method for FMCW radar[J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(5):54-57.
- [8] 宋卫东.三角波雷达信号处理技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
SONG Weidong. Research on triangular wave radar signal processing technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [9] 潘世伟,葛俊祥,金良.基于FPGA的LFMCW雷达信号处理算法及实现[J].雷达科学与技术,2017,15(4):392-396.
PAN Shiwei, GE Junxiang, JIN Liang. A new LFM-CW radar signal processing algorithm based on FPGA and its implementation[J]. Radar Science and Technology, 2017, 15(4):392-396.
- [10] CURTIS W C, BRIAN D P. Radar terminal descent sensor performance during mars science laboratory landing[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(4):1208-1216.
- [11] MARCO I, PASQUALE P, MICHELA V. On the use of ExoMars radar Doppler altimeter for descent module attitude reconstruction[C]//Proceedings of the 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace. Rome, Italy: [s.n.], 2018.

(编辑:刘彦东)