DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.03.017

# 基于单脉冲跟踪体制的 V 频段宽带角跟踪 接收机设计与验证

高玉龙,王玉凡,关 鹏,王珊珊,余晓川

(中国空间技术研究院西安分院,西安710000)

摘 要:随着高通量通信卫星系统对星间数据传输速率需求的不断提高,星间链路的工作频段将 由Ka频段逐渐向频率资源更加丰富的毫米波频段发展。为了满足星间链路对毫米波频段自动角 跟踪系统的发展应用需求,给出了一种基于单通道单脉冲角跟踪技术的V频段宽带角跟踪接收机 的设计方案。采用LTCC和MCM技术实现了V频段接收组件的集成一体化设计;采用基于IQ正 交混频的跟踪调制器结合数字相位补偿的单通道单脉冲角误差信号处理技术完成了宽带输入信 号的角误差信号解调。在产品研制基础上,搭建了V频段角跟踪接收机测试系统,测试结果表明 该V频段宽带角跟踪接收机可以完成对-95dBm~-55dBm 输入信号电平范围内多种宽带数据 传输信号的角误差信号解调,角误差信号抖动优于±250mV;表征输入信号电平强弱的AGC遥测 电压随输入信号电平的增大而单调递增,各项指标满足V频段星间链路建链需求,为我国后续将 要发展的毫米波星间链路系统奠定了扎实的技术基础。

关键词:V频段;宽带;角跟踪接收机;通道一体化;角误差信号解调 中图分类号:V474;V443 文献标志码:A 文章编号:1674-7135(2023)03-0100-05

## Design and verification of a V band wideband angle tracking receiver based on monopulse tracking system

GAO Yulong, WANG Yufan, GUAN Peng, WANG Shanshan, YU Xiaochuan (China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract: With the increasing demand of high throughput communication satellite system (HTS) for inter-satellite data transmission rate, the working frequency band of inter-satellite link will gradually develop from Ka frequency band to millimeter wave band with more abundant frequency resources. In order to meet the development and application requirements of the millimeter wave band automatic angle tracking system for inter-satellite links, a design scheme of V-band wideband angle tracking receiver based on single-channel monopulse-angle tracking technology is presented. LTCC and MCM technologies are used to realize the integrated design of V-band receiving components. The angle error signal demodulation of wideband input signals is completed by using a tracking modulator based on IQ orthogonal mixing and a single channel single pulse Angle error signal processing technology based on digital phase compensation. On the basis of single machine development, the test system of V-band angle tracking receiver can complete the demodulation of various wideband data transmission signals within the input signal level range of  $-95 \, dBm \sim -55 \, dBm$ , and the Angle error signal jitter is better than  $\pm 250 \, mV$ . AGC telemetry

收稿日期:2023-01-16; 修回日期:2023-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:62101436)

引用格式:高玉龙,王玉凡,关鹏,等.基于单脉冲跟踪体制的 V 频段宽带角跟踪接收机设计与验证[J]. 空间电子技术,2023,20 (3):100-104. GAO Y L, WANG Y F, GUAN P, et al. Design and verification of a V band wideband angle tracking receiver based on monopulse tracking system[J]. Space Electronic Technology, 2023,20(3):100-104.

voltage, which represents the strength of the input signal level, increases monotonically with the increase of the input signal level. All these indicators meet the requirements of V-band inter-satellite link construction, which lays a solid technical foundation for the future development of inter-satellite link system in millimeter wave.

Key words: V-band; broadband; angle tracking receiver; channel integration; angle error signal extraction

## 0 引言

随着高通量通信卫星系统发展,为了获得更多的 频率资源,星间链路工作频段将由 Ka 频段逐渐向频 率资源更加丰富的 V 频段发展<sup>[1-2]</sup>。星间链路是卫 星网络信息传输的干线,卫星的每个波束下的每个用 户与位于其他卫星波束覆盖范围内的控制中心或用 户的信息交互均需要通过星间链路来完成,一旦星间 链路中断,则通过卫星之间通信用户的通信链路被破 坏,无法完成正常的信息交互。

相对于 Ka 频段而言 V 频段由于其频带宽、抗干扰性和抗截收能力强、天线与通信设备小等优点,用于卫星通信比其它频段有更加显著的特点,特别是对军事应用更佳,是星间链路技术的发展趋势<sup>[3-6]</sup>。

随着海、空、火箭军的战略转型以及我军信息 化建设对天基信息传输与分发系统依赖性的加强, 现有卫星通信系统在覆盖范围、业务能力、通信容 量、平台与载荷电磁防护等方面已无法适应未来信 息化作战要求,迫切需要发展具备广域覆盖,支持 更高速率、更强抗干扰能力的专用卫星通信系统。 采用"分步发展、重点实施"的策略,研制专用通信 卫星,逐步应用成熟技术,实现我军卫星通信向更 高频段、更强抗干扰能力和更高传输速率发展。

目前我国与欧空局、日本的中继卫星星间链路 均工作于 Ka 频段,仅有美国的 Milstar 和 AEHF 采 用了 V 频段作为星间链路的工作频段,其角跟踪系 统设计资料在公开文献中极少,国内对此领域研究 的公开报道几乎没有,因此有必要开展 V 频段角跟 踪接收机的工程化研究。

## 1 V 频段角跟踪方案

#### 1.1 角跟踪体制

单脉冲跟踪体制属于同时波瓣测角方法,跟踪 速度快,可以获得高的天线和通道效率<sup>[7-16]</sup>。单脉 冲体制跟踪的测角原理是:在同一时间内,数个交 叉配置在等信号线两侧的天线波瓣同时接收目标 信号,通过比较差信号与和信号之间的幅度和相位 差,可以解算出角度误差信号的大小与方向。角误 差信号放大调整后送至后端天线控制器,驱动天 线向角误差信号减小的方向运动,为了减少单脉 冲接收机各通道幅相特性的不一致性,一般将和 差信号合并形成一个单通道信号,即单通道单脉 冲跟踪。

单脉冲单通道误差信号调制解调方案决定了 V 频段单通道调制器和中频跟踪接收机的实现方法。 传统星间链路角跟踪系统方案中单通道调制器必 须采用铁氧体材料的移相器实现,体积大、驱动功 率大,而且接口为波导,难以与其他部件集成。为 了简化单通道调制器硬件设计,对以往单脉冲单通 道误差信号调制解调方案进行改进,将和、差支路 相移调整功能采用数字方案实现,简化单通道调制 器功能,降低分机对单通道调制器的要求,使半导 体调制器的使用成为可能,简化射频通道设计,使 射频通道一体化、小型化成为可能。

#### 1.2 多普勒频移补偿方案

V 频段宽带角跟踪接收机通过上行注入多普勒 补偿指令控制 VCO 进行补偿,采用普通基波晶体振 荡电路来实现。当工作于中频带宽较宽时,可不进 行补偿<sup>[17]</sup>。普通晶振在高低温(-25 ° ~75 ° C)下 频率变化 1.52 kHz,相当于中频信号有 127.68 kHz (1.52 kHz \* 84)的不确定性,图 1 为非温补基波晶 振频率随温度变化曲线图。



该不确定性对于中频带宽为2MHz、8MHz、 40 MHz时,不影响信号频谱主瓣宽度的1/10进入 中频带宽的要求。确保角跟踪接收机中频带宽为 信号频谱主瓣宽度的 1/10 以上,对调制的误差信号 进行幅度检波,从而正常解调出误差信号。当中频 带宽为 500 kHz 时,由于中频有 127.68 kHz 不确定 性时,预置多普勒补偿码仍可保证信标或低码速率 信号的 1/10 主瓣能量以上在 500 kHz 带宽内,满足 幅度检波的要求。

## 2 接收组件设计

#### 2.1 V频段接收组件

V 频段接收组件按照功能模块划分主要包含: V 频段和/差信号低噪放模块、单通道调制模块、本 振模块、V-C 下变频模块和 DC/DC 模块。

其中,低噪声放大模块及跟踪调制模块主要功 能为:

(1)对输入和、差两路信号进行低噪声放大。

(2)在基带角误差信号解调单元提供的基准信 号控制下对差信号进行四相调制,并与和路信号进 行单通道合成。

(3)具有和、差支路增益调整功能。

V-C 下变频模块主要功能为:

(1) 对输入 V 频段信号进行放大。

(2)将 V 频段信号下变频至 C 频段。

(3)对下变频后 C 频段信号进行滤波、放大输出。





Fig. 2 Block diagram of RF receiving components

框图中 V 频段四相调制器采用 IQ 正交混频器 实现正交相位的调制,通过内部的正交功分器实现 90°移相,通过混频二极管的通断实现 180°的移相, 最终实现四相的相位调制。

V 频段接收组件通过 LTCC 和 MCM 技术的应 用实现集成一体化设计,将有效降低通道的体积和 重量,在系统整机设计中可考虑安装于天线后端, 减小连接电缆对系统噪声的影响。采用前级低噪 声放大保证整个电路的低噪声系数,而后级高增益 放大保证整个放大器具有高增益输出。

V频段接收组件工作带宽达到2GHz,噪声系数优于3.5dB,通道增益大于35dB,满足系统使用要求。

#### 2.2 C 频段接收通道

毫米波星间链路角跟踪接收机 C 频段接收通 道采用二次变频超外差接收。接收到的 C 频段信 号经混频、带通放大、二混频成二中频,经带通滤 波、放大、包络检波,得到含有 ΔA 和 ΔE 的时频信 号,送角误差信号解调处理器,解调误差信号并消 除交叉耦合后送后端控制器。毫米波星间链路角 跟踪接收机 C 接收通道组成如图 3 所示。



#### 图 3 C 频段接收通道组成原理框图



## 3 基带角误差信号解调

V 频段角跟踪接收机首次采用了基于 IQ 正交 混频的跟踪调制方法,结合数字相位补偿的单通道 单脉冲角误差信号处理技术。基带角误差信号解 调单元完成对窄波束指向偏差的误差分析,解算出 方位、俯仰误差信号以及数字 AGC 信号,其主要功 能模块如下:

(1)接收来自 C 通道的中频信号并完成角误差 信号的解调。

(2)通过 RS422 串口接收来自天线控制器的遥 控指令完成多普勒频率补偿和相位补偿功能,输出 遥测信息至天线控制器。

(3)输出和/差支路衰减信号至射频通道,控制 和/差支路增益。 (4)输出带宽切换指令至 C 接收通道中的声表 面波滤波器组,完成中频带宽切换,以适应不同速 率数传信号的角误差解调,并接收声表面波滤波器 组发送的带宽切换状态遥测信息。

(5)输出1KHz/2KHz两路同源低频方波信号, 实现角误差信号的解调。

(6) 接收来自 C 通道的表征输入信号电平强弱的 AGC 遥测信息。

(7) 接收来自电源模块的开关机状态遥测 信息。

基带角误差信号解调单元原理框图如图 4 所示。





## 4 测试验证

#### 4.1 V 频段角跟踪接收机技术指标

V 频段角跟踪接收机接收星间链路天线馈源输 出的两路 V 频段和、差信号,将星间链路天线在跟 踪过程中目标偏离天线电轴的角位置误差转换成 能够控制天线运动的角误差信号,其主要技术指标 如表1 所列。

#### 表1 V 频段角跟踪接收机主要技术指标

	tracking receiver	
指标名称	技术指标	实测结果
接收信号频率	60 GHz	60 GHz
信号动态范围	$-95 \text{ dBm} \sim -55 \text{ dBm}$	$-95 \text{ dBm} \sim -55 \text{ dBm}$
方位差/俯仰差	-5V~+5V范围内	-3.36 V ~ $+3.16$ V
角误差零漂	优于 ± 250 mV	$\pm 240 \text{ mV}$
AGC 遥测电压	0~5V范围内	$1.18 \text{ V} \sim 2.82 \text{ V}$
相位补偿精度	优于1.5	1.41°(分析值)

#### 4.2 测试验证

为验证所设计的 V 频段角跟踪接收机性能,

搭建了桌面测试系统,测试系统连接框图如图 5 所示。



### 图 5 V 频段角跟踪接收机桌面测试系统连接框图 Fig. 5 Block diagram of V band angular tracking receiver desktop test system connection

测试结果如图 6 所示,表明在输入中心频率 60 GHz,输入信号电平范围为 – 95 dBm ~ – 55 dBm 的测试工况下,V 频段角跟踪接收机可稳定的解调 出角误差信号,角误差零漂优于 ± 240 mV。





Fig. 6 Curve of bearing difference with input signal level

测试结果如图 7 所示,表明在输入中心频率 60 GHz,输入信号电平范围为 – 95 dBm ~ – 55 dBm 的测试工况下,表征输入信号电平强弱的输出 AGC 遥测随输入信号电平的增大而单调递增,曲线平滑。





测试结果如图 8 所示,表明 V 频段角跟踪接收 机输出方位差与俯仰差随相移因子正交变化,相移 因子为 8 bit,因此移相精度为 360°/28 = 1.406 25°。



## 图 8 角误差信号随相移因子变化曲线(20%调制度) Fig. 8 Curve of angular error signal with phase shift factor(20% degree of modulation)

上述各项测试结果满足 V 频段角跟踪接收机 设计性能指标要求,表明所研制的 V 频段角跟踪接 收机可以完成对 V 频段星间目标的指向跟踪。

## 5 结论

星间链路工作频段将向着频率资源丰富的毫 米波段发展。文章设计的 V 频段角跟踪接收机工 作稳定,各项指标满足系统使用要求,完全达到了 预期效果,初步解决了 V 频段接收组件的设计、调 试和测试等难题。通过桌面测试,验证了产品设计 方案的正确性,并获得了 V 频段角跟踪接收机的指 标情况,该 V 频段角跟踪接收机的研制有较高的工 程指导价值。

#### 参考文献:

- [1] 余晓川.毫米波宽带角跟踪接收机研究与实现[D].西 安:西安电子科技大学, 2014.
- [2] 邓向科,张文政,李正纲. 一种星载 V 频段接收机的设 计[J]. 空间电子技术,2021,18(5):113-118.
- [3] 苗常青,杨显强,范伟,等.一种高精度中继卫星捕获
  跟踪外场无线试验方法[J]. 航天器工程,2018,27
  (6):112-117.
- [4] 汤恩生,赵鸿,周军.角跟踪接收机中的自动校相技术 [J].红外与激光工程,2014,43(1):328-331.

- [5] 程龙.毫米波大规模 MIMO 信道估计和波束对准技术 研究[D].成都:电子科技大学, 2021.
- [6] 马新迎,陈智,马斯,等.空间信息网络中毫米波 MIMO 通信系统关键技术[J].通信学报,2017,38(S1): 179-185.
- [7] KWON H J, LEE Y J, JUNG J W. A study on 1-channel monopulse receiver [J]. Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, 2014, 51 (1):71-76. [LinkOut]
- [8] FOGLIA MANZILLO F, ŚMIERZCHALSKI M, LE COQ L, et al. A wide-angle scanning switched-beam antenna system in LTCC technology with high beam crossing levels for V-band communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(1):541-553.
- [9] 汪晓燕. 单通道单脉冲角跟踪系统的研究[J]. 电讯技 术,2005,45(3)117-120
- [10] KIL H J, LEE Y J, KIM J S, et al. Enhancement for performance of monopulse and target tracking for communication signal tracking [J]. Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, 2014, 51(5):35-43.
- [11] MENG F J, ZENG J M, WANG Y W. The study on the Ka-band tracking receiver [C]//2012 Third International Conference on Intelligent Control and Information Processing,2012:517-520.
- [12] 陈少杰,张亮,吴金才,等.空间激光通信中精跟踪系统的实现与优化[J]. 红外与毫米波学报,2018,37 (1):35-46.
- [13] 方棉佳, 吕涛. 单脉冲和差波束测角的精度研究[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(6):645-649.
- XU Y H, WANG C S, SUN H, et al. A scalable large-signal multiharmonic model of AlGaN/GaN HEMTs and its application in C-band high power amplifier MMIC [J].
   IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017,65(8):2836-2846.
- [15] 乔鹏,吕晓宁,赵军锁,等.应用多星的空间目标跟踪 定位算法[J].航天器工程,2021,30(5):9-15.
- [16] 李强. 单通道数字跟踪接收机的设计 [J]. 无线电通信 技术,2014,40(2):67-69.
- [17] 黎孝纯,邱乐德,陈明章. 星间链路天线跟踪指向系统 [M].上海:上海交通大学出版社,2013.

作者简介:高玉龙(1986—),陕西延安人,硕士,工程师。主要研究方向为星间精密测量与高速数模混合平台开发设计。 E-mail:y-l-gao@163.com