

文章编号 1004-924X(2011)06-1320-07

# 音圈电机驱动的球面副支撑式快速控制反射镜设计

徐新行,王 兵\*,韩旭东,王恒坤,刘廷霞

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要:**为了精确控制光束的传输方向,设计了一种以直线式音圈电机为驱动器的球面副支撑式快速控制反射镜(FSM)。在明确所需 FSM 系统功能和设计要求的基础上,分别对其机械结构、平面反射镜、驱动元件以及角度测量元件进行了设计和选择。完成精密加工、装配、调试后,对 FSM 系统进行了实验测试分析。结果表明,该球面副刚性支撑式 FSM 系统结构简单,承载能力强,谐振频率约为 120 Hz,反射镜稳定精度优于 2",且对振动、冲击、回转等动态工作环境具有较强的适应性,满足系统使用要求。

**关键词:**快速控制反射镜;球面副支撑;直线位移传感器;音圈电机

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1320

## Design of fast-steering mirror with spherical pair supporting structure driven by voice coil actuators

XU Xin-hang, WANG Bing\*, HAN Xu-dong, WANG Heng-Kun, LIU Ting-xia

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, ChangChun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: ylxas@sina.com

**Abstract:** A Fast-steering Mirror(FSM) with a spherical pair supporting structure driven by linear voice coil actuators was designed to control the transmission direction of a laser precisely. The mechanical structure reflector, actuators and angle measurement elements of the system were designed and chosen, respectively, on the basis of functions and design requirements of the FSM. Then, the FSM system was tested and analyzed by experiments after finely manufacturing, assembling and adjusting. The results show that the FSM with the spherical pair supporting structure has simple structure and great carrying capacity, and its steady precision is more than 2" and resonance frequency is about 120 Hz. Furthermore, the system has great adaptability to vibrancy, impact and rotation. Therefore, it can satisfy application requirements.

**Key words:** Fast-steering Mirror(FSM); spherical pair support; distance sensor; voice coil actuator

## 1 引言

在高精度光束控制系统中,快速控制反射镜(FSM)已成为不可缺少的关键技术之一,它作为光学系统中稳定光束和校正光束传播方向的关键性器件,已广泛应用于自适应光学、精密跟踪、光束控制及光通信等领域<sup>[1-4]</sup>。随着现代科技的发展,其应用范围正在进一步拓宽,因此对大口径、高响应速度 FSM 的需求越来越多。但反射镜口径的增大,将直接引起负载惯量的增加和谐振频率的下降,进而限制 FSM 系统的响应速度和控制带宽<sup>[5-6]</sup>。因此,结合系统的使用环境和功能需求,优化设计出口径、响应频率适当的 FSM 系统十分必要。

本文根据某光学系统的要求设计了 FSM 装置并在完成精密加工、装配、调试后,对所研制的 FSM 系统进行了实验测试。结果表明,该大口径球面副支撑式 FSM,承载能力强、转角范围大、响应速度快,且具有较强的环境适应性,更适于车载、机载、舰载等动态工作条件下使用。

## 2 系统的设计要求

FSM 是高精度光束控制系统中灵敏性要求较高的子系统,其主要性能指标包括:跟踪范围、响应速度和有效通光口径。跟踪范围是指反射镜的最大转角,其必须覆盖所要补偿校正的范围;响应速度直接影响着系统的跟瞄能力,与结构的谐振频率,驱动器的响应速度及控制系统的频带宽度有关;有效通光口径反映了系统的光束校正范

围,同时决定着系统的负载,限制了结构谐振频率的提高<sup>[7-8]</sup>。

表 1 列出了 FSM 系统所要求的性能指标和工作环境。本文据此进行了新型球面副支撑式 FSM 系统的设计。

## 3 机械装置设计

### 3.1 驱动元件选择

目前,用于驱动 FSM 系统的动力元件主要有压电陶瓷和音圈电机。其中,压电陶瓷具有分辨率高、响应速度快的突出优点,以它为驱动元件的 FSM 系统响应频率可以达到上千赫兹。不足之处是:压电陶瓷需要的驱动电压非常高,达几百伏,但行程却只有几十微米,而且使用过程中与基座及被驱动元件刚性连接,抗剪切能力较差。与之相对,音圈电机的驱动电压只有几十伏,行程却是压电陶瓷的上千倍。而且音圈电机的磁座与线圈之间存在必要的工作间隙,因此对振动、冲击等恶劣工作环境的适应性远高于压电陶瓷。此外,音圈电机自身的响应频率很高,结合系统机械结构的优化及伺服控制系统的补偿,反射镜的响应速度也可以达到上百赫兹<sup>[9-10]</sup>。

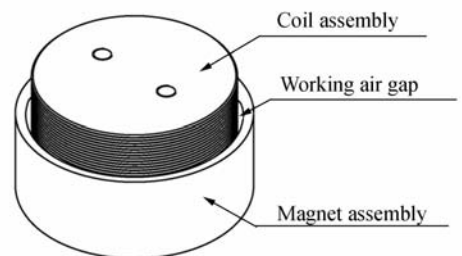


图 1 直线式音圈电机

Fig. 1 Linear voice coil motor

基于以上分析,本文选择直线式音圈电机作为 FSM 系统的驱动元件,图 1 为所选音圈电机的结构示意图。如图所示,这种音圈电机主要由线圈、永久磁铁及各自的支撑件组成。其中,线圈与

表 1 FSM 系统的性能指标及工作环境

Tab. 1 Requisite performances and working conditions of FSM system

Items	Requirement
Optic diameter	$> \Phi 145 \text{ mm}$
Maximum angular range	$\pm 5' (X, Y \text{ axis})$
Resonance frequency	$> 100 \text{ Hz}$
Steady state tip/tilt error	$< 2''$
Working conditions	Existing vibration, Impact and rotation

磁座相互分离,且存在必要的工作间隙。如此一方面避免了线圈与磁座之间的摩擦和碰撞;另一方面使得磁座与线圈之间在做相对直线运动的同时径向方向无约束,从而可实现平面反射镜的小角度偏转。表 2 所列为所选用直线式音圈电机的性能参数。

表 2 所选直线式音圈电机性能参数

Tab. 2 Performances of linear voice coil motor

No.	Items	Value
1	Size of motor	$\Phi 45 \times 28$ mm
2	Total stroke	6 mm
3	Clearance on each side of coil	0.4 mm
4	Elect time constant	0.15 ms
5	Driving voltage	20 V
6	Continuous force	12 N
7	Weight of coil assembly	38 g
8	Weight of field assembly	178 g

### 3.2 平面镜设计

为了实现 FSM 系统实时、快速的响应效果,

要求系统的负载惯量一定要小。因此,在保证平面反射镜具有足够刚度的前提下对其进行最大程度的轻量化十分必要。反射镜轻量化的途径有两个:一是选用比刚度高的材料;二是选择优异的轻量化结构<sup>[11-12]</sup>。在材料选择方面,为了使反射镜保持足够的光学面形精度,要求镜坯材料具有:(1)优异的热物理性能,即选用低膨胀系数、导热性能良好的材料;(2)优异的力学性能,即选用高弹性模量、低密度的材料,有利于反射镜的轻量化;(3)优良的光学可加工性能,即镜坯材料必须能适应光学面形的加工要求或者能经受光学镀膜的工艺条件且可与反射膜结合。

表 3 列出了几种常用反射镜材料的性能参数和价格。根据系统的功能要求,本文选择经济实用的超硬铝作为镜坯材料(选择碳化硅为备份材料)。采用背部开放式结构进行轻量化(如图 2 所示),结构参数如表 4 所列。反射镜的加工工艺为:首先在镜坯表面均匀镀覆镍层,然后进行抛光处理,最后镀覆金反射膜。镜面面形精度 PV 值 $\leq \lambda/10$ (其中, $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ ),满足系统使用要求。

表 3 常用反射镜材料的性能参数和价格对比

Tab. 3 Material performance and prices of several familiar reflectors

Material	Density /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Elastic modulus /(GPa)	Specific stiffness /( $10^6 \text{Nm} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	Thermal expansivity /( $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Thermal conductivity /( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Price of raw material (about) /(¥)
Tu1	8.94	117	13.1	16.7	392	700
Lc9	2.79	72	25.8	23.4	176	100
K9	2.50	70	28.0	7.2	0.29	600
RB-SiC	3.11	373	119.9	2.7	147	50 000

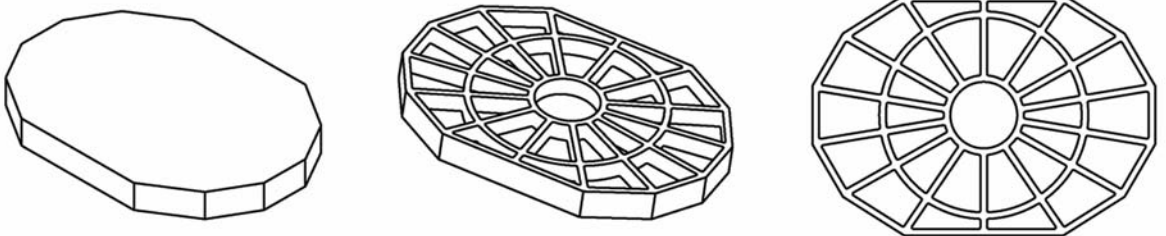


图 2 平面反射镜轻量化结构示意图

Fig. 2 Structure of lightweight reflector

表 4 平面反射镜的轻量化参数

Tab. 4 Structure parameters of lightweight reflector

Material	Size /mm	Thickness /mm	Width of rib /mm	Highness of rib /mm	Weight /kg	Lightening ratio/%
Lc9	210×150	20	6	10	0.98	28
RB-SiC	210×150	20	4	12	0.91	41

### 3.3 机械结构设计

如图 3 所示,设计的球面副支撑式 FSM 系统主要由平面反射镜、外球面镜框、内球面镜座、钢球、直线式音圈电机、支撑弹簧、基座和角度检测元件等组成。其中,镜座的外表面和镜框的内表面均为球面的一部分,二者之间通过高精度钢球实现刚性连接,同球心装配,组成球面运动副,则装有平面反射镜的镜座即可在镜框中万向旋转。在正交分布的 4 个音圈电机的推/拉力作用下,实现反射镜的二维转动。4 个线位移测量传感器对称布置于音圈电机的外侧,用于测量反射镜的偏转角。由图 3 可知,FSM 系统的转动部分主要由

平面反射镜、外球面镜座和音圈电机组成。为了减小系统负载的惯量,除了对平面反射镜进行轻量化设计外,还选择音圈电机的线圈与镜座相连作为动子,这是因为电机磁座的质量较大,一般为线圈的 3~5 倍。另外,还要尽可能减轻外球面镜座的重量。图 4 为此镜座的组成结构示意图,如图所示,外球面镜座主要由铝制芯板和钢制镜座外球面两部分组成。如此设计,既保证了镜座外球面具有足够的硬度和强度,又减轻了负载重量,并且有效地减弱了音圈电机磁场与外球面镜座之间的互相影响。

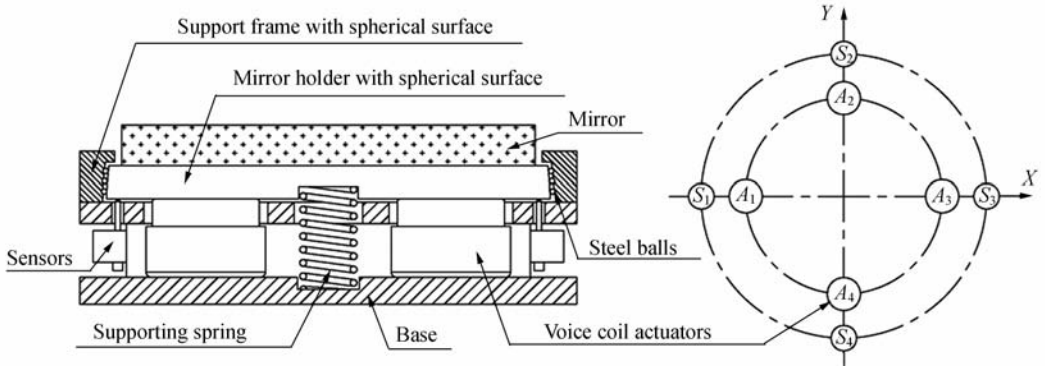


图 3 球面副支撑式 FSM 系统结构组成及传感器分布示意图

Fig. 3 Diagram of FSM structure with spherical pair and locations of actuators (A) and sensors(S)

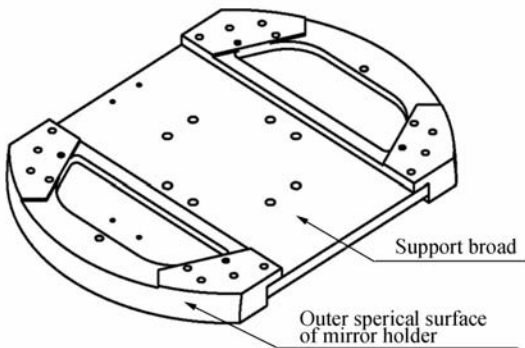


图 4 外球面镜座组成结构示意图

Fig. 4 Constitue structure of mirror holder with spherical surface

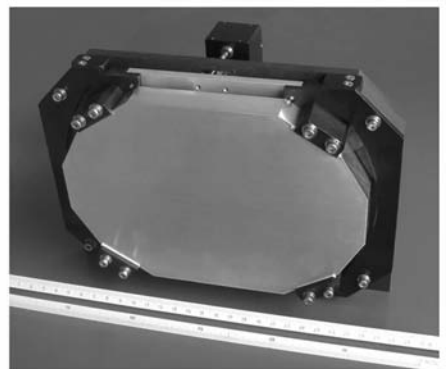


图 5 FSM 系统的实物照片

Fig. 5 Photograph of FSM

此球面副式结构的突出优点是:系统的负载由镜框间接支撑,既无复杂的轴系,又实现了刚性连接,大大提高了系统的承载能力和抗剪切能力,对振动、冲击、回转等动态工作环境具有较强的适应性。图 5 为 FSM 系统的实物照片。

### 3.4 角度检测元件设计

图 6 为自行设计的线位移测量传感器,测量范围为  $\pm 2.5 \text{ mm}$ , 全行程测量精度优于  $3 \mu\text{m}$ , 测量分辨率优于  $0.12 \mu\text{m}$ , 转换为角度测量分辨率, 优于  $0.3''$ 。4 个传感器均布于  $\Phi 160 \text{ mm}$  的节圆上, 用于间接测量平面反射镜的偏转角。由于 FSM 系统的跟踪范围远小于传感器的测量行程, 因此, 反射镜偏转角的相对测量精度很高。另一方面, 如图 3 所示, 在轴线方向上每个音圈电机的外侧各布置一个线位移测量传感器, 即绕每个轴线的转角由 2 个传感器测量, 有效地减小了平面反射镜因轴向位移造成测量误差, 显著提高了系统的控制精度。此外, 系统采用接触式测量方式, 结构紧凑、空间体积小、可靠性高。

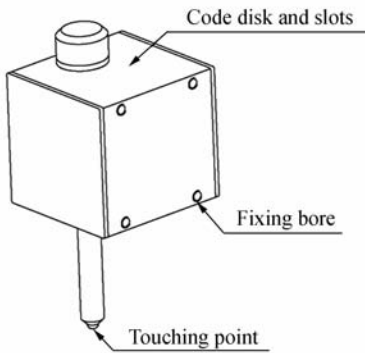


图 6 线位移测量传感器

Fig. 6 Sensor for linear distance

## 4 实验测试

室温条件下, 对 FSM 系统的闭环控制带宽进行了实验测试。如图 7 所示, 实验系统主要由实验平台、FSM 装置、伺服控制器、功率驱动器等组成。系统的工作原理是: 当光路检测系统发现发射光束光轴存在偏差时, 首先, 由线位移测量传感器测出平面反射镜的实际位置, 进而与目标位置进行实时对比, 并将此比较结果反馈给控制器。然后, 由控制系统根据此对比偏差驱动 X 轴、Y 轴上相应的音圈电机进行伸/缩运动, 从而实现平

面反射镜的微角度偏摆。如此反复, 直到发射光束光轴精确对准。

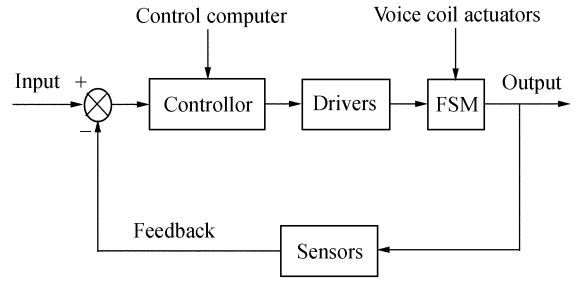


图 7 控制系统组成结构图

Fig. 7 Diagram of control system

图 8 为实验所得控制系统的幅频特性曲线, 如图所示, 系统的截止频率  $\omega_b \approx 250 \text{ rad/s}$ , 则相应的闭环控制带宽  $f_b = \omega_b / 2\pi \approx 40 \text{ Hz}$ ; 而由振动实验所测得系统的机械谐振频率  $f_R \approx 120 \text{ Hz} \gg f_b$ 。因此可知, 本文所设计的 FSM 系统具有谐振频率高、动态滞后小、控制系统稳定的特点。同时, 用平行光管检测了 FSM 系统的定角度稳定性, 结果显示反射镜可稳定在  $2''$  以内。实验检测结果表明: 所研制的球面副支撑式 FSM 系统工作性能稳定、可靠, 满足设计要求。

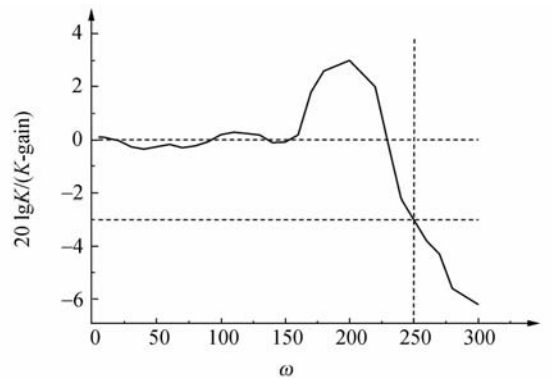


图 8 控制系统的闭环幅频特性曲线

Fig. 8 Closed-loop amplitude-frequency characteristic curve of control system

## 5 结论

本文系统设计了高精度光束控制系统中的 FSM 子系统, 并且对所研制的 FSM 子系统进行实验测试, 得出如下结论: (1) 音圈电机凭借自身

高速度、高频响、高精度的特点及较压电陶瓷高行程、低驱动电压的优势,更适于工程应用,正逐渐成为FSM系统的首选驱动元件之一。(2)新型球面副支撑式FSM系统,既无复杂轴系结构,又实现了刚性承载,从根本上提高了系统的承载能

力和抗剪切能力。(3)研制的大口径音圈电机驱动型FSM,具有承载能力强、转角范围大、响应速度高的优点,并且对振动、冲击、回转等动态工作环境具有较强的适应性,更适于车载、机载、舰载等工作条件下使用。

### 参考文献:

- [1] SUITE M R, BURRIS H R, MOORE C I, *et al.*. Fast steering mirror implementation for reduction of focal-spot wander in a long-distance free-space communication link [J]. *SPIE*, 2004, 5160: 439-446.
- [2] 张丽敏, 郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. *光学精密工程*, 2005(13): 142-147.  
ZHANG L M, GUO J. Simulative research on dual X-Y axis control of fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005(13): 142-147. (in Chinese)
- [3] FELIX E, MORGAN S, WASSON A, *et al.*. Large, high performance, fast steering mirrors with FPGA-embedded controls [J]. *SPIE*, 2009, 7466: 74660H1-74660H10.
- [4] 邵帅, 高云国, 郭劲, 等. 二维快速控制水冷反射镜装置设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 493-498.  
SHAO S, GAO Y G, GUO J, *et al.*. Design of two-dimensional fast-steering cooling mirror equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 493-498. (in Chinese)
- [5] 凌宁, 陈东红, 官春林, 等. 两维高速压电倾斜反射镜 [J]. *光电工程*, 1995, 22(1): 51-60.  
LING N, CHEN D H, GUAN CH L, *et al.*. Two-dimension piezoelectrical fast steering mirror [J]. *Opto-Electric Engineering*, 1995, 22(1): 51-60. (in Chinese)
- [6] FRANCISC M T, EDINER D J, HILBY T R, *et al.*. High bandwidth fast steering mirror [J]. *SPIE*, 2005, 587707: 01-14.
- [7] SWEENEY M, RYNKOWSKI G, KETABCHI M, *et al.*. Design considerations for fast steering mirrors (FSMs) [J]. *SPIE*, 2002, 4773: 63-73.
- [8] 张丽敏, 郭劲, 陈娟. 快速反射镜机械结构研究综述 [J]. *光机电信息*, 2005(3): 21-24.  
ZHANG L M, GUO J, CHEN J. Summary of the mechanic structure for fast-steering mirrors [J]. *Opt. Informtion*, 2005(3): 21-24. (in Chinese)
- [9] 邱晓波, 窦丽华, 单东升, 等. 光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 220-226.  
QIU X B, DOU L H, SHAN D SH, *et al.*. Design of active disturbance rejection controller for electro-optical tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 220-226. (in Chinese)
- [10] TANG T, HUANG Y M, FU CH Y, *et al.*. Acceleration feedback of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 013001.
- [11] 王延凤. 主反射镜轻量化工程分析计算 [J]. *光学精密工程*, 1995, 3(6): 66-70.  
WANG Y F. Computer aided engineering analysis and calculation of the light weight primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(6): 66-70. (in Chinese)
- [12] YODER P R. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

## 作者简介:



徐新行(1983—),男,河南沈丘人,助理研究员,2009年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事光机结构的研究和设计。E-mail: xxh123321xxh@163.com



王恒坤(1977—),男,黑龙江巴彦人,助理研究员,2003年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电传感技术及光机结构的研究和设计。E-mail: whengkun@tom.com

## 通讯作者:



王 兵(1964—),男,吉林长春人,研究员,1986年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光电对抗方面的研究。E-mail: ylxas@sina.com



刘廷霞(1973—),女,吉林抚松人,博士,副研究员,1998年,2002年于吉林工学院分别获得学士、硕士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电经纬仪精密控制及其算法的研究。E-mail: liutingxia2001@sohu.com



韩旭东(1975—),男,山东博兴人,副研究员,1998年于长春理工大学获得学士学位,2001年,2007年于中科院研究生院分别获得硕士和博士学位,主要从事光电传感技术及光机结构的研究和设计。E-mail: hanxd@ciomp.ac.cn

## ● 下期预告

## 基于谐振腔精密控制的合成孔径激光雷达信号产生方法

来 志,曾晓东,冯喆君,曹长庆

(西安电子科技大学 技术物理学院 501 室,西安 陕西 710071)

为获得高效的合成孔径激光雷达信号,提出一种通过精密控制谐振腔提高激光线性调频信号有效功率的方法,并给出了激光器的调频实现。首先对驱动信号进行分析获得其傅里叶谱,从而判断调腔信号有效功率低的实质是调腔器件对信号高次谐波响应较差;通过在谐振腔驱动电路中引入高次谐波响应模块,最终有效地减小了信号调频波形下降沿,提高了合成孔径激光雷达信号的有效功率。对所获得的调频信号性能指标进行了测试,结果表明,调频周期为 1 ms,调频带宽达到了 789 MHz,信号功率中有用功率由 72% 提高到 92% 以上。