

空间电磁环境监测用双探针式星载电场探测仪

任 仁^{*①②} 陈贤祥^① 夏善红^① 吕元生^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要: 针对空间电磁环境监测需求, 该文介绍了双探针式在轨电场探测方法。概述了双探针式、天线式和电子漂移式 3 种检测方法的异同, 重点探讨了双探针式电场测量方法的原理、系统组成及测试标定方法。设计实现了敏感探头和数据采集处理单元, 通过阻容耦合方式模拟电场仪在轨工作环境对系统进行了测试。测试结果显示 SLF, VLF 和 HF 频段的噪声本底分别小于 $4 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$, $1 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 和 $0.5 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 。

关键词: 电场传感器; 双探针式; 空间电磁环境

中图分类号: TP732

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)10-2489-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00299

Spaceborne Double-probe Electric Field Sensor for Space Electromagnetic Environment Monitoring

Ren Ren^{①②} Chen Xian-xiang^① Xia Shan-hong^① Lü Yuan-sheng^{①②}

^①(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper presents a method of double-probe electric field in-orbit detection. Differences of three kinds of instrument including double-probe type, antenna type and electron drift type are briefly introduced. The principle, architecture and calibration method of double-probe spaceborne electric field sensor are described in detail. Sensitive probe and signal acquisition & processing units are implemented and tested with sensor in-orbit environment simulation through resistive coupling. Experiment results indicate that noise amplitude spectrum intensity of band SLF, VLF, HF are less than $4 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$, $1 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$, $0.5 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ separately.

Key words: Electric field sensor; Double-probe; Space electromagnetic environment

1 引言

电离层和磁层电场是空间物理和空间环境一个重要参数, 太阳活动、磁暴、地壳运动与人类活动等都会引起电离层和磁层电场的变化^[1,2]。研究电离层和磁层电场、电流的结构、形态以及产生和演变的过程, 有助于深入认识和研究电离层的动力学行为; 同时, 对太空中电磁环境和等离子体特性进行探测, 研究电场、磁场和电离层参量变化的相关性, 可以用于地震、火山等自然灾害的监测, 用于空间天气对人类活动(包括通讯、导航和 GPS 定位等)的影响研究。无论是研究空间天气通过磁层和电离层对人类活动的影响, 还是研究地壳运动与人类活动对电离层和磁层的影响, 都需要对电离层和磁层电场进行高精度的探测。

从地面对电离层和磁层的观测研究, 由于受到地理位置、自然条件和资金等的影响, 只能对电离层和磁层的一些局部区域进行观测和研究, 难以获得全球电离层和磁层的信息。而在轨探测则具有全天候、全方位的时间与空间优势。通过连续观测全球电离层和磁层变化规律, 可以建立全球电磁场模型和全球电离层模型。作为空间环境探测的关键载荷, 国外 Cluster II, Compass II, Demeter 等多颗卫星上都配置了星载电场探测仪。欧空局的 Cluster II 卫星上同时配置了双探针式和电子漂移式两种电场探测仪^[3], 其中双探针式电场探测仪的工作频段为 0~32 kHz, 电子漂移式电场探测仪的工作频段低于 10 Hz。俄罗斯 Compass II 卫星上配置的是天线式电场探测仪^[4], 工作频段是 100~15 MHz。法国于 2004 年发射的 Demeter 低轨三轴稳定卫星上配置的是双探针式电场探测仪^[5], 其工作频段为 0~3.2 MHz。

本文介绍了中国科学院电子学研究所国内首

2012-03-23 收到, 2012-06-18 改回

国家 863 计划项目(2007AA12Z134)资助课题

*通信作者: 任仁 renren@mail.ie.ac.cn

先研制的双探针式星载电场探测器,主要用于空间电磁环境监测,分别从检测原理、系统构成、测试方法 3 个方面进行了详细论述,最后给出了双探针式星载电场探测器的测试结果。

2 检测原理

根据工作原理,星载电场探测器主要分为双探针式、天线式和电子漂移式三大类。其中,双探针式电场探测器的工作原理如图 1 所示,通过测量电离层中两点之间的电位差再除以两点之间的距离得到所要探测的电场强度,在太空中布置多个连线两两正交的探头即可实现对等离子体环境中 3 维电场信号的测量。天线式电场探测器是应用天线原理来测量环境电场;电子漂移式电场探测器是根据测量电子枪发射的电子在电场与磁场作用下的运动轨迹和时间等参数来间接测量电场强度^[6]。

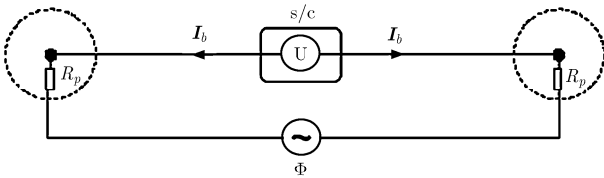


图 1 双探针式电场探测器工作原理

这几类电场探测器各有优缺点,具体的性能比较见表 1,电子漂移式电场探测器的优点是受卫星本体电位的影响较小,但工作频段较窄,对环境磁场的大小有要求,结构复杂,成本高昂;双探针式电场探测器的优点在于工作频段宽,对环境磁场无要求,对高能电子和磁场的变化不敏感,其缺点是易受卫星本体电位大小的影响。而天线式电场探测器只能测量数十 kHz 以上的电场值,不能测量直流和低频段的电场信号。

在这 3 类星载电场探测器中,双探针式电场探测器具有工作频段宽,直流可测,对环境磁场无要

求等优点。虽然双探针式电场探测器易受卫星充电效应的影响,但是可以通过对卫星平台的优化设计及其在卫星平台上的合理安装与布局来克服,所以最终采用了双探针式电场测量方案。

3 系统构成

3.1 敏感探头

电离层环境电位通过等离子体阻抗耦合到探测器的球形探头上。在直流段与低频段,起主要作用的是耦合电阻。耦合电阻的大小与粒子种类、粒子能量和探头的半径有关,在 700 km 高的电离层中,该耦合电阻的大小约为 1 MΩ 左右。当卫星位于地球南北两极的上空时,粒子浓度较低、能量较高,耦合电阻较大。为了避免由于等离子体环境的变化引起该耦合电阻的变化,从而造成对等离子体电位测量的误差,要求探头前置放大器的输入电阻尽量高,在这里选择了 JFET 输入级的运放,其输入电阻在 10^{11} Ω 以上。在普通轨道耦合电阻对测量结果的影响几乎可以忽略不计,但在一些等离子体的耗尽区域(比如极区),等离子体浓度较小,此时的耦合电阻较大,通过对探头偏置电压大小和方向的调节,改变探头的偏置电流,从而使探头与周围等离子体之间的耦合阻抗控制在 1 MΩ 以内,保证探头内部前置放大器的测量精度。图 2 为星外敏感探头的工作原理图。其中敏感探头内的检测电路主要完成如下 3 个功能:等离子体环境电位信号的检测,偏置电流调节,探头内的温度测量。图 3 为探头实物照片。

3.2 探头布局与频段划分

为实现对等离子体环境电场的正交三分量探测,在卫星平台周围配置不共面的 4 个星外敏感探头以获取电离层的 3 维电场信息。已有研究^[7-10]表明影响探头测试精度的主要因素为卫星平台的充放

表 1 不同工作原理电场探测器的性能比较

	双探针式	天线式	电子漂移式
对周围磁场的要求	无	无	有
频段	DC 到 MHz	数十 kHz 以上	DC 到数十 Hz
通道数	3 维	3 维	一般情况下只能测量垂直于磁场方向的 2 维电场,理论上可以测量 3 维,但仪器复杂度将会极大地增加
对卫星与等离子体相互作用的敏感度	敏感	不敏感	不敏感
对磁场变化的敏感度	不敏感	不敏感	敏感
可以测量的其他数据	卫星本体电位,工作在 Langmuir 探针模式还可以测量等离子体密度和温度	从功率谱的临界频率可看出电子浓度的变化	磁场强度

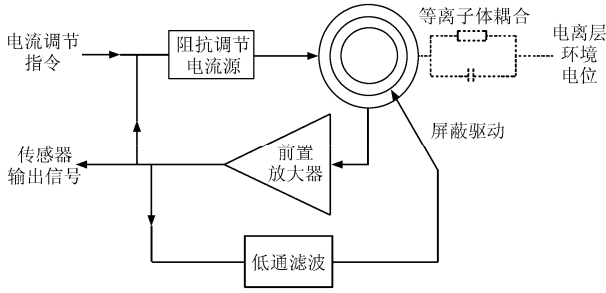


图 2 敏感探头工作原理



图 3 敏感探头实物

电效应以及探头在卫星平台上的安装方式。安排探头与卫星平台的布局如图 4 所示。

E_1, E_2 两探头通过伸杆与卫星平台连接，向上伸展布置，避开卫星太阳能帆板；在与 E_1, E_2 连线垂直的方向上，将 E_3, E_4 两个探头朝下布置，两个探头的连线与卫星飞行方向的夹角大于 5° ，避免探头和伸杆相互之间形成尾迹效应的影响。另外，4 个探头距离卫星平台的距离需要大于 3 m，以减小卫星平台和太阳能帆板带电对电场测量精度的影响；同时要保证探头远离卫星运动产生的尾迹区域。

测量的电场是在电场坐标系下的数据，需要转

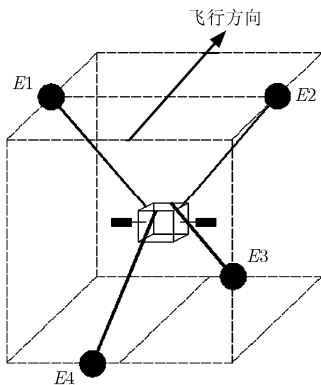


图 4 探头在卫星上的布局示意图

换到卫星坐标下分析使用。针对图 4 的布局方式计算得到电离层中正交的三分量电场信号为

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ l_{12} & l_{12} & l_{12} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ l_{13} & l_{13} & l_{13} \\ x_4 - x_3 & y_4 - y_3 & z_4 - z_3 \\ l_{34} & l_{34} & l_{34} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{13} \\ E_{34} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 l 为探头间距， x, y, z 为探头坐标。卫星在轨运行时电场探测仪坐标系下的三分量电场由 3 组差分信号组成，分别为： $E_{12} = E_1 - E_2, E_{34} = E_3 - E_4$ 和 $E_{13} = E_1 - E_3$ 。若 E_1 和 E_3 中任何一个不能正常工作，都会影响到两个分量的电场矢量，因此在设计时可以通过对电路施加遥控指令来选择 E_2 或 E_4 代替其中失效的探头，以确保 E_1 和 E_3 其中一个探头失效时，还能得到两个方向的电场矢量信号。

根据需要的信号测量和处理精度，将电场信号划分为如下 3 个频段共 8 个通道：

(1)DC/SLF(0-300 Hz)：接收来自前端模拟单元的 4 路直流和准直流信号，用 4 片 24 位 ADC 以 3 kHz 采样率获得连续波形数据。

(2)VLF(200 Hz-30 kHz)：接收 3 路 VLF 频段信号，用 3 片 16 位 ADC 以 300 kHz 的采样率获得连续波形数据。

(3)HF(20 kHz-10 MHz)：由控制单元选择一路 HF 频段信号，用 1 片 12 位 ADC 以 40 MHz 的采样率获得连续波形数据。

3.3 采集和处理单元

模拟单元对输入的 4 组探头模拟信号依次进行低噪声放大和差分组合放大处理，经开关切换选择后形成 8 个通道，每个通道分别进行低通或带通滤波形成不同频段，再经过阻抗匹配放大后送到数字单元进行模拟数字转换。其基本原理框图如图 5 所示。

图 6 是实际电路的频率响应曲线。由测试曲线可以看出，3 个频段区分明显，电路很好地实现了频段划分功能，四阶滤波也很好地保证了截止频率特性。

电场探测仪的信号处理与控制系统为数字电路组成，其原理框图如图 7 所示。主要实现的功能有多通道模拟信号的数字化转换，数据的预处理和打包传输，解译遥控遥测指令，各单元控制信号生成，分析计算载荷工作参数，监视、控制与切换载荷的工作状态。

卫星运行过程中，探头相对于卫星平台对称放置，伸杆切割磁力线，从而在伸杆上会产生电位方

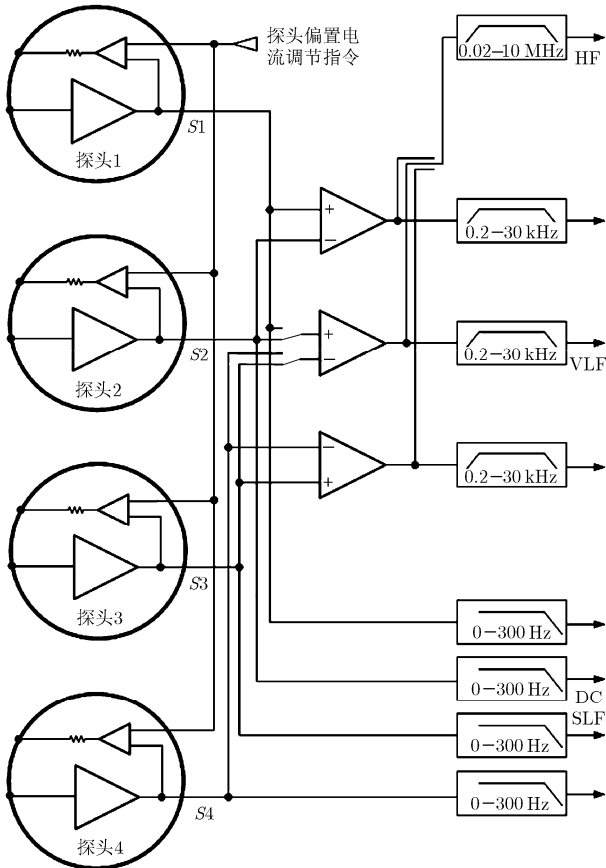


图5 模拟信号处理单元框图

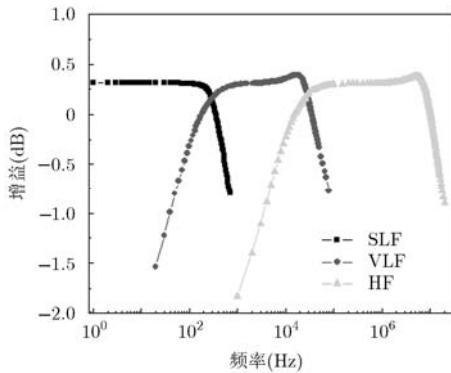


图6 频率响应曲线

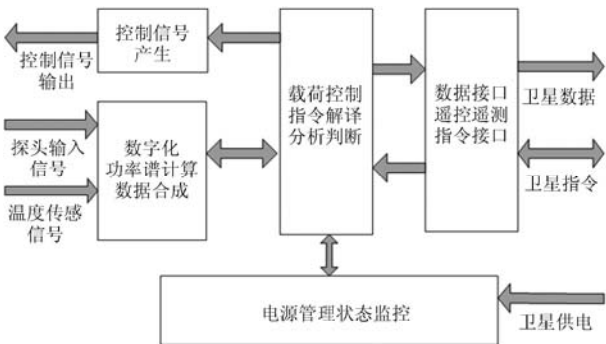


图7 信号处理与控制系统原理框图

向相反，大小近似相等的感生电动势，使得探头电流收集特性变化，导致电压测量误差。与法国 Demeter 卫星等电场探测器不同的是，在探头偏置电压控制单元的基础上，增加了伸杆偏置电压主动控制单元。采用计算机模拟的方法对伸杆主动电位控制的作用进行了仿真，分别设置伸杆相对于探头电压为+4 V, +2 V, 0 V, -2 V, -4 V, 仿真结果如图 8 所示。由图可知，当伸杆相对于探头为正电压时，会引起探头的电流收集特性发生较大的改变，从而影响探头上的测量电压，增加额外的电场测量误差；当对伸杆施加负的主动电压控制时，探头电流收集特性较为一致，对探头测量电压的影响非常小。因此，对伸杆主动施加负的偏置电压控制，可以大为降低伸杆上感生电动势对星载电场探测器电场测量精度的影响。

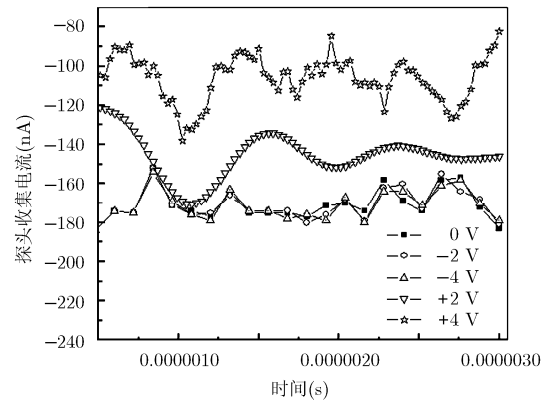


图8 伸杆主动电位控制的计算机仿真结果

4 测试

由于在地面上难以产生内部有标准均匀电场的等离子体环境，所以对电场探测器的地面测试标定和法国 Demeter 以及欧空局 Cluster II 卫星一样，根据其探测原理采用间接标定方式。即使用并联的等效电阻、电容来模拟电场探测器在太空实际探测过程中星外敏感探头与等离子体环境之间的耦合电阻与耦合电容。将敏感探头置于电磁屏蔽性能良好的电场标定箱中，通过标准信号产生单元产生不同频率的正弦信号通过模拟耦合电阻和电容加载至敏感探头，以此实现整个电场探测器的测试和标定工作。

在应用中最关键的指标为整个系统的噪声本底状况，图 9 所示为 3 个频段的噪声幅度谱测试结果。结果显示：SLF 频段的噪声本底小于 $4 \mu\text{V}\text{m}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ ，VLF 频段的噪声本底小于 $1 \mu\text{V}\text{m}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ ，HF 频段的噪声本底小于 $0.5 \mu\text{V}\text{m}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 。法国 Demeter

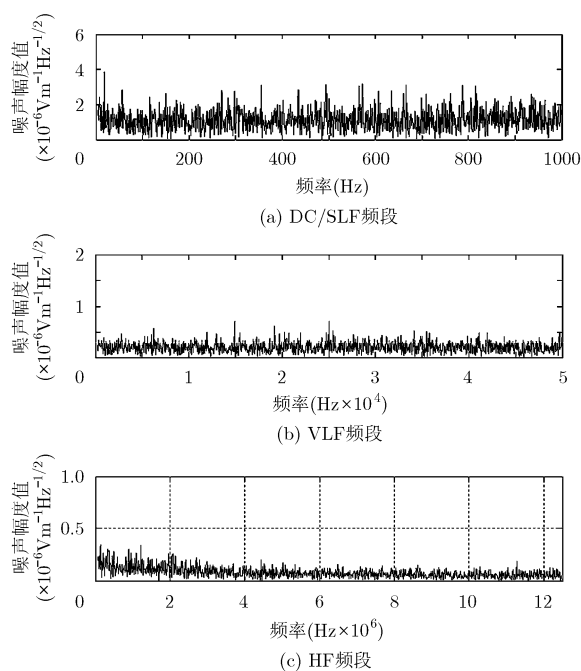


图 9 噪声幅度谱

卫星电场探测仪的性能指标为：SLF 频段噪声本底小于 $10 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ ，VLF 频段的噪声本底小于 $1 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ ，HF 频段的噪声本底小于 $0.2 \mu\text{Vm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 。两相对比，本文研制的双探针式星载电场探测仪的 SLF 频段噪声本底优于法国 Demeter 卫星的电场探测仪，VLF 频段的噪声本底与法国 Demeter 卫星的电场探测仪相当，HF 频段的噪声本底略大于 Demeter 卫星的电场探测仪。

5 结束语

空间对地观测相较于地面观测具有观测范围广，不受地面自然条件限制的优势。采用星载电场探测仪对电离层和磁层电场进行探测，在日地空间物理研究、空间天气通过磁层和电离层与人类活动的互相影响研究等方面都具有重要意义。本文介绍了双球式星载电场探测仪的工作原理，从探头设计、星上布局、系统频段划分、采集处理单元和测试标定方法等多个方面对星载电场探测仪的研制进行了详述，通过对伸杆实施主动电位控制，减少了伸杆切割磁力线带电对电场测量精度的影响。研制出的星载电场探测仪的原理样机，将工作频率上限提高到 10 MHz，测试结果表明双探针式电场探测技术方案可行，性能指标与国外同类仪器相当。

参 考 文 献

[1] Sharma A K, Patil A V, Haridas R N, *et al.* Detection of ionospheric perturbations associated with earthquake using data of IAP and ISL instruments of DEMETER satellite [C].

- General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey, 2011: 1-4.
- [2] Yamauchi T, Yoshida M, and Hayakawa M. The wave-like structures of ionospheric perturbation associated with Sumatra earthquake of 26 December 2004, as revealed from VLF observation in Japan of NWC signals Takumi Horie[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(9): 1021-1028.
- [3] Paschmann G, *et al.* The electron drift instrument on cluster: overview of first results[J]. *Annales Geophysicae*, 2001, 19(10): 1273-1288.
- [4] Kuznetsov V D, Bodnar L, Garipov G K, *et al.* Orbital monitoring of the ionosphere and abnormal phenomena by the small Vulkan-Compass-2 satellite[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, 51(3): 329-341.
- [5] Berthelier J J, Godefroya M, Leblanca F, *et al.* ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5): 456-471.
- [6] Eriksson A I, Andre M, Klecker B, *et al.* Electric field measurement on Cluster: comparing the double-probe and electron drift techniques[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(1): 275-289.
- [7] 杨集, 陈贤祥, 夏善红. 低轨道卫星表面充电模拟[J]. *微纳电子技术*, 2007, 44(7): 25-27.
- Yang Ji, Chen Xian-xiang, and Xia Shan-hong. Numerical simulation of low earth orbit satellite charging[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2007, 44(7): 25-27.
- [8] Chen Xian-xiang, Ren Ren, Yang Ji, *et al.* Double-probe spaceborne electric field sensor for earthquake precursor detection in ionosphere[C]. The 4th International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, May 24-26, 2011: 411-412.
- [9] Chen Xian-xiang, Yang Ji, Ren Ren, *et al.* Numerical simulation of the influence of cylindrical electrode length on double-probe spaceborne electric field sensor[C]. The 4th International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Beijing, May 24-26, 2011: 415-416.
- [10] 杨集, 陈贤祥, 周杰, 等. 伸杆对星载电场探测仪的影响研究 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 1010-1012.
- Yang Ji, Chen Xian-xiang, Zhou Jie, *et al.* Study of the influence of booms on spaceborne electric field sensors[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 1010-1012.

任 仁：男，1982年生，博士生，助理研究员，研究方向为电场传感器与系统应用。

陈贤祥：男，1979年生，副研究员，研究方向为新型传感器与系统应用。

夏善红：女，1958年生，研究员，博士生导师，研究方向为传感器与系统、先进制造技术、信号处理等。