

文章编号: 2095-4980(2015)05-0783-05

基于准光技术的亚毫米波单脉冲天线

张 龙, 窦文斌

(东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 基于准光技术在亚毫米波频段设计分析了一种单脉冲天线。采用时域有限差分(FDTD)方法结合斯特拉顿-朱兰成(Stratton-Chu)公式对该准光单脉冲天线的辐射性能进行了严格的仿真分析。为了进一步抑制辐射和波束方向图的副瓣电平, 引入了修正的介质双曲透镜。仿真结果表明, 该单脉冲介质透镜天线具有良好的辐射特性, 其中和波束的副瓣电平小于 -11.9 dB, 差波束的零深低于 -30.0 dB, 不平衡度小于 0.50 dB。

关键词: 亚毫米波; 准光; 单脉冲天线; 介质透镜

中图分类号: TN821⁺.5

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0783

Sub-millimeter wave monopulse antenna based on quasi-optical technology

ZHANG Long, DOU Wenbin

(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: A new monopulse antenna is designed and analyzed based on quasi-optical technology at sub-millimeter wavelengths. The radiation performances of the proposed monopulse antenna are rigorously investigated by combining the Finite Difference Time Domain(FDTD) method and the Stratton-Chu formula. In order to suppress the side lobe levels of sum radiation patterns, a modified hyperbolic-plano dielectric lens with cutting segments is introduced. The simulated results show that this monopulse dielectric lens antenna has good radiation characteristics with the side lobe levels below -11.9 dB in sum patterns, the maximum null-depth below -30.0 dB and the amplitude imbalance below 0.50 dB in difference patterns.

Key words: sub-millimeter wave; quasi-optical; monopulse antenna; dielectric lens

毫米波亚毫米波系统具有高分辨力、高增益、宽带宽、抗干扰能力强等特点, 使其越来越多地应用到各个领域, 如遥感探测、无线电导航、等离子诊断、雷达以及卫星通信^[1]。近年来, 单脉冲天线以其测角精确度高、测速快、抗干扰能力强等优点, 被广泛应用于卫星通信系统中^[2-3]。在微波毫米波频段, 基于各种传输线结构如波导、微带、共面波导、基片集成波导等构成的单脉冲天线或和差比较器得到了广泛研究^[4-6]。然而, 随着工作频率的不断升高, 各种传输线都存在尺寸变小、损耗增大、承受功率减小、加工难度大等不足。

准光技术^[1,7]利用电磁波在空间聚束传播的方式来传递信号, 在亚毫米波频段, 与其他传输线相比具有损耗小、承受功率高、加工难度相对低、可多波束多极化工作等优点。1996年, 德国学者 Rolf J 提出了工作于 140 GHz 的低损耗、多极化工作的准光和差比较器^[8]。2005年, 东南大学的安刚在 W 波段分析了结合球面透镜的准光单脉冲天线结构^[9]。

本文在亚毫米波频段分析设计了一种准光单脉冲天线, 采用时域有限差分法(FDTD)^[10]结合 Stratton-Chu^[11]公式研究了其辐射特性。为了改善单脉冲天线的辐射性能, 引入了修正的介质双曲透镜, 仿真计算结果表明, 该单脉冲介质透镜天线具有良好的和差辐射特性。

1 准光单脉冲天线

准光单脉冲天线由以下几部分组成: 馈电喇叭(如对角喇叭或波纹喇叭)、球面薄透镜、准光和差比较器。图

1 给出了所设计的准光单脉冲天线的结构示意图及其相关参数。

馈电喇叭辐射高斯波束,其辐射高斯波束的束腰半径为 w_0 。常见的高斯波束馈源有圆波纹喇叭天线、双模/多模圆锥喇叭天线、介质加载混合模喇叭、对角型喇叭天线等,其中前几类喇叭馈源天线的高斯波束基模辐射效率最高,能达到 98% 以上,而对角型喇叭天线的高斯波束辐射效率约为 84%。但是,在亚毫米波段,圆波纹喇叭天线的加工难度较大且价格昂贵;而双模/多模圆锥喇叭天线、介质加载混合模喇叭天线由于其多模工作原理,所以频带相对较窄。对角型喇叭天线加工较为简单,且工作频带较宽,所以本文设计中,采用本实验室现有的对角型喇叭天线作为高斯波束馈源。球面薄透镜可实现高斯波束的波束束腰变换,将馈电喇叭天线的辐射高斯波束耦合进准光和差比较器,且与准光和差比较器所要求的入射高斯波束相互匹配。球面薄透镜的焦距为 f ,入射高斯波束的入射距离为 d_1 ,出射高斯波束的出射距离为 d_2 。准光和差比较器由 2 个相互平行的平面反射镜和一个 3 dB 波束分束器构成。其中 3 dB 波束分束器与平面反射镜相互平行,且位于 2 个平面反射镜中间,并与入射高斯波束的传播方向成 45° 夹角。3 dB 波束分束器实现反射波和透射波的功分,且反射波和透射波存在 90° 相位差,因此,为实现和差比较器输出口径面上的等幅同相或等幅反相的场分布,和差比较器的口径 l_0 满足条件:

$$l_0 = (n + 0.5)\lambda_0 / 2 \quad (1)$$

式中: n 为整数; λ_0 为工作波长。准光单脉冲天线的相关参数如表 1 所示。

利用 FDTD 结合 Stratton-Chu 公式对准光单脉冲天线进行仿真分析。首先基于 FDTD 可求出准光单脉冲天线辐射口径面上的场分布,然后根据 Stratton-Chu 公式可求得其远场辐射特性。Stratton-Chu 公式可表示为:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \iint_S \{ j\omega\mu[\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}')]G_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') - [\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}(\mathbf{r}')] \times \nabla' G_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') - [\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}')] \nabla' G_0(\mathbf{r},\mathbf{r}') \} d\mathbf{s}' \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 表示计算远场电场值; S 为时域有限差分方法计算近场表面; j 表示虚数; ω 为角频率; μ 为自由空间磁导率; $\hat{\mathbf{n}}$ 为近场表面法向; $\mathbf{r}'$ 为源场坐标位置; $\mathbf{r}$ 为计算远场坐标位置; $\mathbf{H}(\mathbf{r}')$ 为近场磁场值; $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$ 为近场电场值; $G_0(\mathbf{r},\mathbf{r}')$ 表示自由空间格林函数。

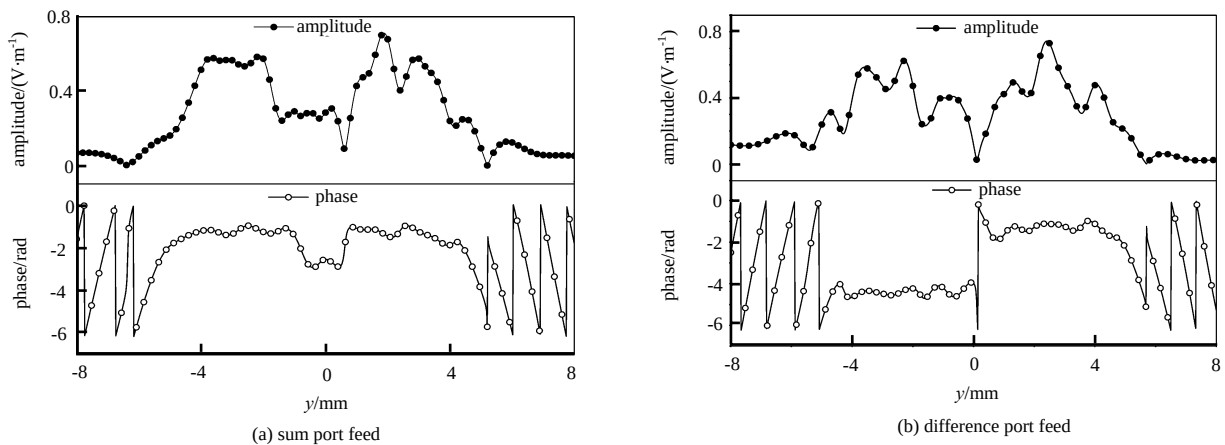


Fig.2 Aperture field distribution
图 2 馈电口径场分布

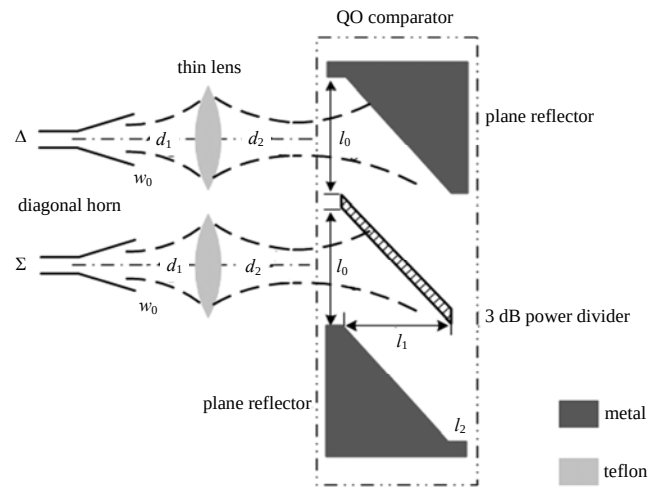


Fig.1 Configuration of quasi-optical monopulse antenna
图 1 准光单脉冲天线的结构示意图

表 1 准光单脉冲天线的参数

symbol	value/mm	symbol	value/mm
w_0	1.50	l_0	4.62
d_1	8.36	l_1	4.62
d_2	8.36	l_2	0.80
f	8.36		

图 2(a)和图 2(b)分别给出了中心频点上和差端口分别馈电时, FDTD 法计算准光单脉冲天线输出口径上的电场幅度和相位分布。从口径场分布可以看出, 和端口馈电时, 口径上的场相位基本同相; 差端口馈电时, 口径上的场相位反相。

求得口径场分布之后, 进而可知其辐射特性。图 3(a)和图 3(b)分别给出了不同频点上的归一化和差辐射方向图。其中, f_0 表示中心频点 375 GHz, f_1 和 f_2 分别表示上下边频点 374 GHz 和 376 GHz。图 3(a)和图 3(b)的结果表明: 在中心频点 375 GHz 处, 差波束的零深电平低于 -30.0 dB, 幅度不平衡度小于 0.65 dB; 而和波束的副瓣电平较高, 约为 -5.0 dB。因此, 下一部分通过引入双曲介质透镜, 期望能够降低辐射和波束的副瓣电平, 同时使得辐射差波束的特性基本保持不变。

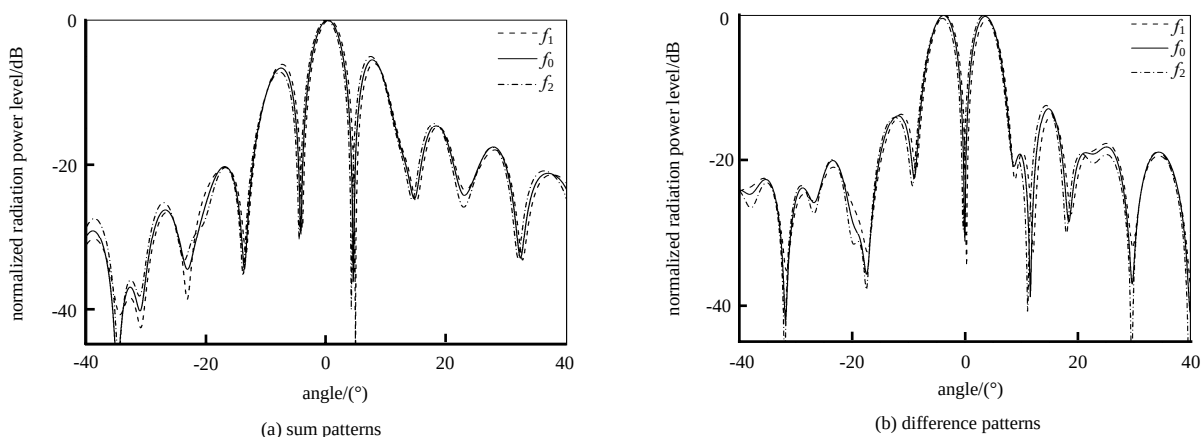


Fig.3 Normalized radiation patterns

图 3 归一化辐射方向图

2 单脉冲介质透镜天线

介质透镜由高性能, 低损耗的介质材料构成, 作为聚焦器件, 已被广泛应用于光学成像和聚焦领域。通过适当改变透镜的几何形状并选取合适的材料, 介质透镜可将不同形式的波束转变为平面波。电磁领域的介质透镜天线即利用此特性来校正天线辐射口径面上电磁场的幅度分布和相位分布, 从而改善天线的辐射性能。介质透镜天线和抛物反射面天线在很多情况下可应用于相同的领域, 如微波遥感、多卫星跟踪及空间望远镜全波段天文观测等。与抛物反射面天线相比, 介质透镜天线存在一定的缺点: 低频段时尺寸重量较为庞大; 具有内部损耗(介质损耗)和表面反射损耗等。但是同时其又存在较多的优点: 设计自由度大; 不存在馈源的口径遮挡; 造价低; 受外界环境影响小等。因此, 本文在亚毫米波频段选择介质透镜来改善准光单脉冲天线的辐射性能。所设计的介质透镜为修正的介质双曲透镜, 为了补偿辐射口径面上的相位分布, 在普通介质双曲透镜的非折射表面挖去部分, 形成衍射剖面以改变口径场的相位分布, 其结构示意图如图 4 所示。经过优化计算, 修正的介质双曲透镜的参数如表 2 所示。

图 5(a)和图 5(b)分别给出了和差端口分别馈电时, 采用 FDTD 计算的普通介质双曲透镜和修正介质双曲透镜口径处电场分量的相位分布。从出射口径场的相位分布可以看出, 修正的介质双曲透镜由于在其非折射表面形成了衍射剖面, 使得其

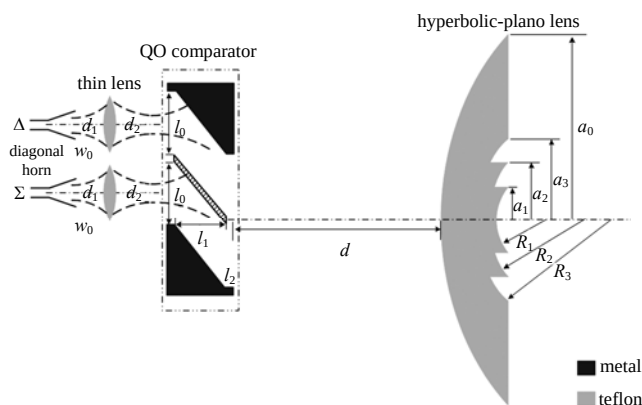


Fig.4 Configuration of monopulse dielectric lens antenna

图 4 单脉冲介质透镜天线的结构示意图

表2 修正的双曲介质透镜的参数

Table2 Parameters of modified hyperbolic dielectric lens

symbol	value/mm	symbol	value/mm
d	14.94	R_1	3.38
a_0	12.60	R_2	5.70
a_1	2.48	R_3	8.96
a_2	3.65	f	23.94
a_3	4.54		

口径处的和端口馈电时的相位分布更加均匀,从而可以降低副瓣电平,改善辐射性能。

利用 FDTD 求出的口径场分布,可进一步求得其辐射特性。图 6(a)和图 6(b)分别给出了和差辐射方向图。从辐射方向图结果可以看出,结合修正的介质双曲透镜,使得准光单脉冲天线的辐射特性发生了较大变化,口径增大使得辐射和波束的主瓣变窄,而副瓣电平从原来的 -5.0 dB 降低到 -11.9 dB,得到了较为明显的改善;同时,辐射差波束的特性几乎未受到影响,零深电平依然接近 -30.0 dB,不平衡度小于 0.5 dB。

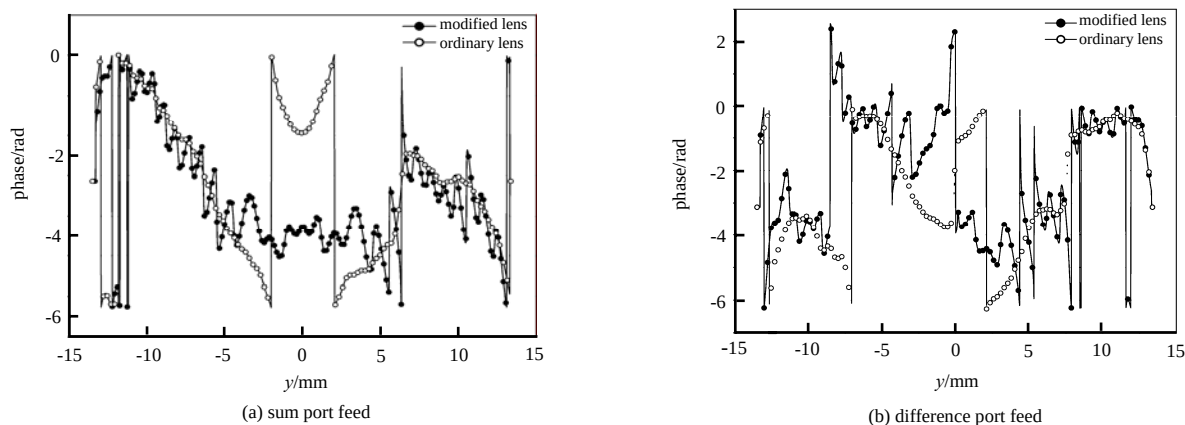


Fig.5 Phase distribution of feed

图5 馈电的相位分布

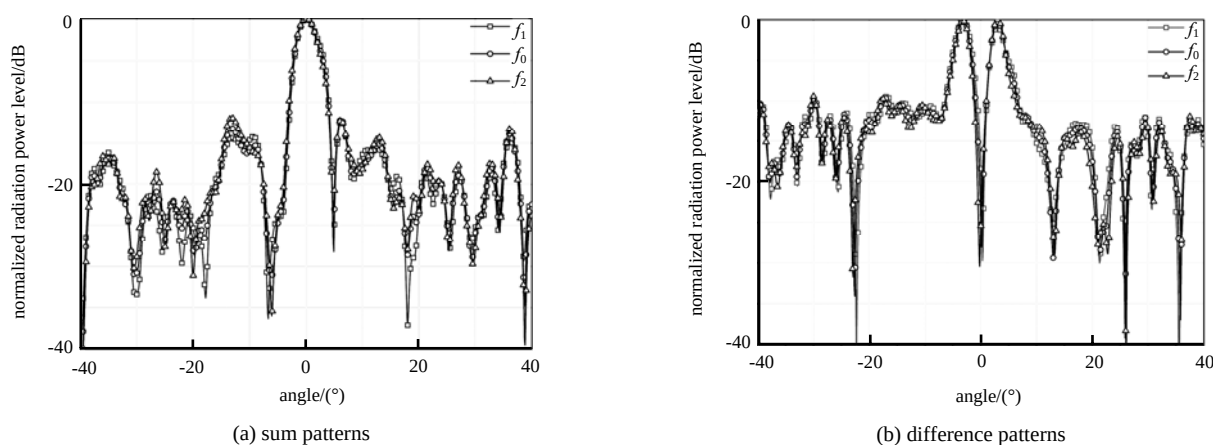


Fig.6 Normalized radiation patterns

图6 归一化辐射方向图

3 结论

本文通过严格的数值计算方法分析设计了工作于亚毫米波频段的准光单脉冲天线。为了进一步改善准光单脉冲天线的辐射性能,引入了修正的介质双曲透镜。结果表明:该单脉冲介质透镜天线的和差辐射特性得到了较为明显的改善,其中和波束的副瓣电平低于 -11.9 dB,差波束的零深电平接近 -30.0 dB,不平衡度小于 0.50 dB。

参考文献:

- [1] 窦文斌. 毫米波准光理论与技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2006. (DOU Wenbin. Millimeter Wave Quasi-optical Theory and Techniques[M]. Beijing:Higher Education Press, 2006.)
- [2] Hawkins G J, Edwards D J, McGeehan J P. Tracking sysem for satellite communications[J]. IEE Proceedings, 1988,135(5): 393-407.
- [3] Sherman S M. Monopulse Principles and Techniques[M]. Dedham,MA:Artech House, 1984.
- [4] Sierra-Castaner M, Sierra-Perez M, Vera-Isasa M, et al. Low-cost monopulse radial line slot antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003,51(2):256-262.

- [5] WANG H, FANG D G, CHEN X G. A compact single layer monopulse microstrip antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(2): 503-509.
- [6] CHENG Y J, HONG W, WU K. 94 GHz substrate integrated monopulse antenna array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 121-129.
- [7] Goldsmith P F. Quasi-optical Systems: Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications[M]. Piscataway, N J: IEEE Press, 1998.
- [8] Rolf J. A novel quasi-optical monopulse tracking system for millimeter-wave application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(6): 466-477.
- [9] AN G, DOU W B. Analysis of a sphere lens quasi-optical monopulse antenna/feed structure[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Application, 2005, 19(1): 83-93.
- [10] Taflov A, Hagness S C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method[M]. Boston, MA: Artech House, 2005.
- [11] Balanis C A. Antenna Theory Analysis and Design[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.

作者简介:



张 龙(1988-), 男, 陕西省渭南市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为亚毫米单脉冲天线. email: zhanglongseu@163.com.

窦文斌(1954-), 男, 云南省曲靖市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微波毫米波理论技术、准光技术、毫米波与亚毫米焦面阵成像等。

2015 全国复杂电磁环境下的电磁效应技术研讨会

随着电子技术的快速发展及各类电子设备和信息化产品在军事领域的日益广泛应用, 电磁环境越来越呈现出其复杂多变的重要特性, 面对当前复杂电磁环境条件, 如何确保电子设备在复杂电磁环境条件下的工作是国内外电磁环境领域的研究热点, 这是涉及到军民两个领域的现实问题; 我们当前面临的电磁环境问题与矛盾日益突出: 复杂混乱的电磁环境, 装备的电磁环境效应问题突出, 频谱的动态利用也成为一个问题。为此, 中国电子学会在 2014 年会议的基础上, 拟于 2015 年 12 月举办“2015 全国复杂电磁环境下电磁效应技术研讨会”, 藉此机会, 中国电子学会将邀请相关领域的专家分享在复杂电磁环境相关领域的研究成果和思想建树。现就有关事项通知如下:

一、时间地点: 2015 年 12 月 11 日~13 日 11 日报到 地点: 北京

二、大会组织机构:

主办单位: 中国电子学会

承办单位: 中国电子学会会员与组织机构服务中心

三、大会交流形式

特邀专家报告: 大会将邀请复杂电磁环境下的电子设计领域的著名专家, 就复杂电磁环境下的电磁效应技术的应用和最新动态做特邀报告

四、拟邀请大会报告

1、题目: 电子战装备现状与发展; 2、题目: 复杂电磁环境问题研究; 3、题目: 系统间电磁环境适应性试验的几个问题; 4、题目: 电磁频谱安全与控制; 5、题目: 复杂电磁环境认知与构建; 6、题目: 基于通用仪器的威胁电磁环境构建与评估; 7、题目: 通信装备的强电磁脉冲防护技术; 8、题目: 临近空间高速目标链路综合效应和信道建模; 9、题目: 复杂电磁环境效应仿真与评估; 10、题目: 复杂电磁环境下的电子设备防护; 11、题目: 无人机系统复杂电磁环境适应性测试技术

五、收费标准

会议费: 1500 元/人, 中国电子学会会员及团体报名(三人以上)享受 85 折优惠, 会议期间食宿费用自理。

六、会务事项:

1、报名方式: 参会人员可发送邮件至以下邮箱索取报名回执表注册参会

E-mail: 961055790@qq.com, zhangjie@cie-info.org.cn

2、会务及招商咨询:

中国电子学会会员部 张杰 010-68246068 手机: 13811330009;

3、收款单位: 中国电子学会 开户行: 工商银行北京公主坟支行

帐号: 0200004609089100591 (汇款注明复杂电磁环境研讨会)

4、报到事项: 会务组另行通知。