

文章编号: 2095-4980(2017)05-0798-05

多频带的 D 波段毫米波通信

王凯辉, 余建军

(复旦大学 信息科学与工程学院 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: D 波段是毫米波频段的一种, 其频率范围在 110~170 GHz。作为一种新的频段资源, 它有着更高的载波频率, 因此可以承受更大的带宽和传输速率, 成为毫米波通信中的研究热点。本文首先对系统传输链路进行理论分析, 然后基于光生毫米波系统产生了 134.4 GHz 的 D 波段毫米波, 并考虑到实际应用中的多用户情况, 通过直接调制器和 IQ 调制器产生了 5 个频带的 D 波段毫米波信号, 对其传输性能进行了实验探究。验证了其传输性能和传输速率及传输距离之间的关系。

关键词: 毫米波; D 波段; 光载无线(RoF)

中图分类号: TN928

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0798

Demonstration of a multi band millimetre wave system at D band

WANG Kaihui, YU Jianjun

(Education Ministry Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science, Information Science and Engineering School, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: D band is a kind of millimetre wave ranging from 110 GHz to 170 GHz. As a new frequency band resource, it has higher carrier frequency which leads to wider bandwidth and higher transmission rate. For this reason, it attracts more and more focus in recent years. In this paper, the principle of transmission link is analyzed firstly. Secondly, a D-band millimetre wave is generated based on photonic beating technique. Considering the situation of multi-user in practical application, a millimetre wave signal with five bands is generated by an Intensity Modulator(IM) and a I/Q modulator. At last, some experiments are performed to explore the performance of this system and verify the relationship between Bit Error Rate(BER) performance and Baud rate/wireless distance.

Keywords: millimetre wave; D-band; Radio-over-Fiber(RoF)

宽带无线通信系统已经在接入网、本地网以及室内网络等场景扮演着重要角色, 当前的低延时、高容量传输方案要求无线系统和光纤传输链路能够无缝衔接^[1]。相比于传统无线传输的有限带宽资源, 毫米波通信系统有着较宽的带宽, 因此能够很好地支持光载无线(RoF)系统^[1-2]。由于毫米波系统搭建简单, 能够弥补光纤链路的不足, 在军事、民生、救援等方面有着重要意义, 因此成为了学术界的研究热点并引起了各国政府的广泛关注。由于 W 波段的毫米波具有相对较小的大气衰减, 适合用于长距离传输场景, 复旦大学课题组在此前的报道中实现了载频 85.5 GHz 的 20 Gb/s 的 PDM-QPSK(Polarization Division Multiplexing-Quadrature Phase Shift Keying)信号的离线系统, 并成功传输了 1.7 km 的无线距离^[3]。实时毫米波传输方面, 复旦大学课题组成功实现了 1.485 Gb/s 的实时视频传输系统, 并在室内和室外分别传输了 3.9 m 和 265 m^[4]。D 波段频率范围在 110 GHz 到 170 GHz 之间, 比常见的 W 波段载波频率更高, 因此它能够支持更大的带宽和传输速率, 在救灾、空间通信、军事以及环境科学方面都有着广泛的应用前景^[5]。目前越来越多的研究工作也围绕着 D 波段毫米波通信系统展开: 先前的研究实现了速率高达 60 Gbit/s、无线距离 0.4 m 的 D 波段无线传输^[6]; 之后, 基于光生毫米波的 D 波段 2×2MIMO 光-无线传输系统也被实现, 并达到了 32 Gbit/s 的传输速率^[7]。本文中, 首先分析光载无线(RoF)系统中无线链路部分的理论损耗^[8-10], 接着基于光生毫米波技术产生具有 5 个频带的 D 波段毫米波信号, 经过一定距离的无线传输之后通过外差相干技术接收并进行解调。

收稿日期: 2017-03-17; 修回日期: 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61325002; 61527801; 61675048)

1 理论分析

根据经典的 Friis 传输公式^[9], 可以得到由一个发射天线和一个接收天线所组成的无线链路的接发功率关系表达式:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{A_r A_t}{d^2 \lambda^2} \quad (1)$$

式中: P_r 表示接收端天线接收到的有效功率; P_t 表示输入发射天线的功率; A_t 和 A_r 分别表示发射天线和接收天线的有效口径; d 表示无线传输距离; λ 表示传输信号的波长。一般将有效口径 A 转换为天线的增益 G , 它们的关系式如下:

$$G = 4\pi A / \lambda^2 \quad (2)$$

再考虑到与传播场景无关的系统损耗系数 L , 可以将式(2)代入式(1)中, 由此得到接收信号的功率为:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 L d^2} \quad (3)$$

但很容易发现, 在式(3)中, 一旦距离 d 变得很小甚至接近于零时, 接收信号的功率将会变得非常大, 这显然不符合常理。考虑到本实验中的传输距离较短(<1 m), 故需要修正以上公式。通过引入路径损耗指数 n , 可以得到适合近场情况的对数模型:

$$P_r(d)(\text{dBm}) = 10 \lg \left(\frac{P_t(d_0)}{0.001 \text{ W}} \right) + 20n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (4)$$

式中 d_0 为近场条件下引入的参考距离, 满足 $d > d_0$, 当 d_0 为 1 m 时即为式(3)的形式。考虑到其他的损耗项, 发射功率和天线增益及损耗之间的关系式可进一步写为:

$$P_R = P_t + G_t + G_r - L_p - L_f - L_A \quad (5)$$

式中: L_p 为自由空间中的路径损耗; L_f 为馈线损耗; L_A 为大气损耗因子, 但由于在短距离通信中 d 比较小, 大气损耗通常可以忽略不计。

2 实验系统介绍

本实验中所搭建的 D 波段毫米波传输系统的结构如图 1 所示。在发射端, 携带了调制信息的信号光 and 固定频率的本振光相互拍频以产生 D 波段的毫米波。首先由一个线宽小于 100 kHz 的外腔激光器(External Cavity Laser, ECL)产生功率 14.1 dBm 且中心频率为 193.060 0 THz 的连续光。之后经过一组级联的强度调制器(Intensity Modulator, IM)和 IQ 调制器, IM 为一个具有 36 GHz, 3 dB 带宽的马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)且工作在最小传输点处, 给它提供频率为 8 GHz 且经过一个功率放大器(Power Amplifier, PA)放大的正弦波信号驱动, 可以得到 5 个频率等间隔的光载波。接着把 Matlab 产生的发射数据载入输出波特率范围在 0~12 GHz 的任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)中, 由其产生所需要的 I 路和 Q 路模拟信号, 完成数字信号到模拟信号的转换。通过放大器放大后, 输入-3 dB 带宽为 30 GHz 的 IQ 调制器, 此时, IQ 调制器的输出为具有 5 个等间隔频带的信号光, 其信号光谱如图 2(a), 相邻载波的中心频率相差 8 GHz。

在实验中分别传输了 DFTS-OFDM-16QAM 和 SC-16QAM 信号。对于 DFTS-OFDM-16QAM 信号, 其 IFFT 的长度为 1024。每个 OFDM 符号中有 980 个子载波携带了 16QAM 信号, 考虑到直流偏置, 因此将第 1 个子载波设为 0, 余下的 43 个子载波也被设为 0 以起到过采样的作用。由于采用了 DFTS, 每个有效子载波的 SNR 在 FFT 之后被重新分配, 由此实现了 OFDM 信号峰值平均功率比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)的降低^[10]。在 IFFT 之后, 又加上了长度为 64 的循环前缀(Cyclic Prefix, CP)以避免符号间干扰的影响(Inter-Symbol Interference, ISI)。接着, 每隔 15 个符号就插入 1 个数据已知的训练序列(Training Sequence)用以估计信道和载波恢复过程。最后在每个 OFDM 帧的前面加上长度为 1 000 的 0 以方便时钟同步。对于 SC-16QAM, 即单载波信号, 其基带电信号的伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)长度为 211×4。OFDM 和单载波信号在接收端接收到的电谱分别如图 2(c)和图 2(d)所示, 每个频带之间的频率间隔都为 8 GHz。

经过 IQ 调制器后的信号光功率较小, 需经过一个掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)放大之后才与本振光源产生的本振光耦合传输。它们的中心频率相差 134.4 GHz, 其光谱如图 2(a)所示, 通过一个 D 波段带宽 110~170 GHz 的光电二极管(Photodiode, PD)拍频之后即可得到相应频率的 D 波段毫米波。最后, 毫米波信号通过一个增益为 25 dBi 的喇叭天线(Horn Antenna, HA)发射。

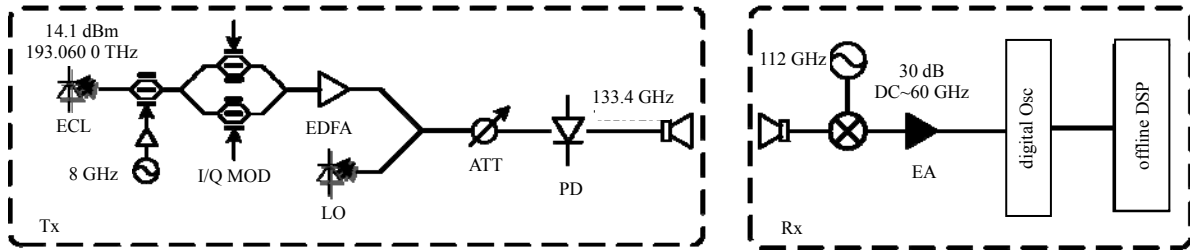


Fig.1 Setup of a D-band millimetre wave transmission system
图 1 D 波段毫米波传输系统结构示意图

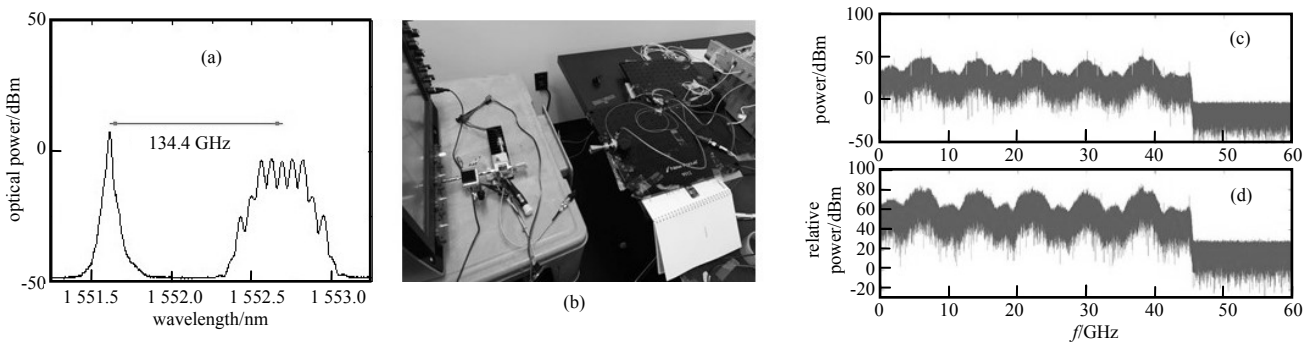


Fig.2 (a) signal optical spectrum; (b) photo of the experimental system; (c) spectrum of DFTS-OFDM 16QAM signal; (d) spectrum of SC-16QAM signal
图 2 (a) 信号光谱; (b) 实验装置图; (c) DFTS-OFDM 16QAM 信号接收电谱; (d) 单载波 16QAM 信号接收电谱

在接收端, 主要完成的是信号的外差相干检测过程: 经过大气介质传输的毫米波信号由一个同样型号、同样极化方向的喇叭天线接收。但由于信号载频的频率过高, 无法直接由数字示波器采样, 故首先需要进行一次电域的下变频过程。采用了一个 112 GHz 的微波源, 其产生的射频信号和接收到的信号通过一个 D 波段混频器后即可得到相应的中频信号, 其中心频率在 22.4 GHz 附近。此时信号的频率范围已经在数字示波器的有效带宽内, 故将信号经由一个增益为 30 dB, 工作频率为 0~60 GHz, 型号为 Centellax A06530MPR1 的电放大器 (Electrical Amplifier, EA) 放大后, 即可用采样率为 120 GSa/s, 电带宽为 45 GHz 的数字示波器采样接收。采样后的信号通过离线处理即可恢复出原始信息。对于 DFTS-OFDM 信号, 离线 DSP 过程包括下变频、时钟恢复及同步、信号估计和恢复、星座点解映射和误码率 (BER) 计算过程。对于 SC-16QAM 信号, 离线 DSP 包括下变频、恒模算法 (Constant Modulus Algorithm, CMA) 和级联多模算法 (Cascaded Multi Modulus Algorithm, CMMA) 均衡、载波恢复、差分译码以及 BER 计算。

3 实验结果分析

为了探究此系统的性能, 分别传输了 DFTS-OFDM 16QAM 信号和单载波 16QAM 信号。在固定距离的情况下探究了系统性能与发送信号波特率的关系, 并在固定信号发送波特率的情况下探究了系统性能与无线传输距离的关系。

3.1 传输性能和发送信号波特率的关系

首先, 将无线传输距离固定在 4 cm, 发送信号的波特率在 3 GHz 至 7 GHz 之间改变。分别求得每个频带所携带信号的误码并计算其平均值, 得到的误码率-波特率曲线如图 3(a)所示。图 3(b)和图 3(d)是基带带宽为 6 GHz 和 3 GHz 时解得的 DFTS-OFDM 16QAM 信号星座图; 图 3(c)和图 3(e)是波特率为 6 GHz 和 3 GHz 时解得的单载波 16QAM 信号星座图。可以看到, 误码率整体随信号的波特率增加而升高, DFTS-OFDM 与单载波的性能也较为相近。

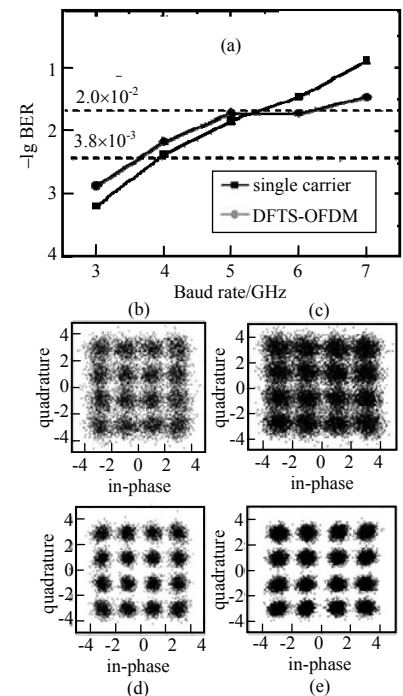


Fig.3 BER versus Baud rate and constellations
图 3 误码率-波特率曲线与解调信号星座

单载波信号可根据：净比特率=波特率×信道数量×每符号比特数×(1-判决开销)的关系式求得能够传输的净比特率大小。

对于 OFDM 信号，也可以根据类似的关系式求得传输净比特率：净比特率=波特率×信道数量×每符号比特数×(1-判决开销)×每帧中有效 OFDM 符号占比×每符号中有效子载波占比×(1-循环前缀长度占比)。

根据以上关系式，去除 7% 的硬判决开销，SC-16QAM 可在 3.8×10^{-3} 的 FEC 门限下实现 $4 \times 5 \times 4 \times 93\%$ Gbit/s = 74.4 Gbit/s 的无误码稳定传输；DFTS-OFDM-16QAM 可以实现 $3 \times 5 \times 4 \times 93\% \times (15/16) \times (980/1024) \times (16/17)$ Gbit/s = 47.1 Gbit/s 的无误码传输。在软判决门限(2.0×10^{-2})的限制下 OFDM 和单载波信号的波特率最高可做到 5 GHz 左右，去除 20% 的软判决开销，可以实现 $5 \times 5 \times 4 \times 80\%$ Gbit/s = 80 Gbit/s 的 SC-16QAM 信号传输或者 $5 \times 5 \times 4 \times 80\% \times (15/16) \times (980/1024) \times (16/17)$ Gbit/s = 67.6 Gbit/s 的 DFTS-OFDM 信号传输(每个 OFDM 符号有 1024 个子载波，其中有效子载波为 980 个；每 16 个符号中包含 1 个训练符号；每个符号的循环前缀长度为符号长度的 1/16)。

3.2 传输性能和无线传输距离的关系

接着，将发送信号的波特率固定在 4 GHz，改变无线链路的长度以探究系统性能和无线传输距离之间的关系。由此得到的误码率-距离曲线如图 4(a)所示，图 4(a)中的误码率为 5 个频带误码率的平均值。

图 4(b)和图 4(d)是无线距离为 12 cm 和 4 cm 时解得的 DFTS-OFDM 16QAM 信号星座图；图 4(c)和图 4(e)是无线距离为 12 cm 和 4 cm 时解得的 SC-16QAM 信号星座图。可以看到当误码率取对数时，系统的误码率-距离曲线基本为一条直线，印证了上文式(4)的对数模型。从图 4(a)中可知，DFTS-OFDM-16QAM 信号可以在软判决门限下稳定传输 12 cm；SC-16QAM 信号可以在软判决门限下稳定传输 8 cm。由于本实验中并没有在天线的接发射端加入功率放大器(PA)，故能够传输的无线距离较短。若在发射端和接收端都加入一个增益为 30 dB 的功率放大器，则传输距离能延长约 212 倍(功率每增加 6 dB，传输距离能延长约 1 倍)，即能将 DFTS-OFDM-16QAM 信号传输约 491 m，将 SC-16QAM 信号传输约 328 m。若将实验中的喇叭天线替换成具有更大增益与更好方向性的卡塞格伦天线，信号能够稳定传输更远的距离，达到几公里之远。

4 结论

由于 D 波段的频率较高，因此很难实现具有良好性能的 D 波段毫米波系统。此实验中，在没有功率放大器的情况下实现了具有 5 个频带的 D 波段毫米波可靠传输，模拟了多用户使用的场景，对今后的研究与实际应用具有指导意义。在加入功率放大器后，可以拉长无线传输距离并在发射天线之前经过一段数十千米的光纤传输，构成一个较为成熟的 RoF 系统。在当前 5G 研究的热潮下，此 RoF 系统是 5G 前传(Front haul)网络的一种有效解决方案。虽然当前对于 D 波段的研究依旧处于初期阶段，但作者相信在不久的将来，D 波段毫米波系统将会在通信网络中发挥巨大作用。

参考文献：

- [1] YU Jianjun, LI Xinying, ZHANG Junwen, et al. 432-Gb/s PDM-16QAM signal wireless delivery at W-band using optical and antenna polarization multiplexing[C]// European Conference on Optical Communication. Cannes, France: IEEE, 2014.
- [2] LI Xinying, YU Jianjun, ZHANG Junwen, et al. A 400G optical wireless integration delivery system[J]. Optics Express, 2013, 21(16):18812-18819.
- [3] XIAO Jiangnan, YU Jianjun, LI Xinying, et al. 20-Gb/s PDM-QPSK signal delivery over 1.7-km wireless distance at W-band[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2015:1-3.
- [4] 秦超逸, 许育铭, 王哈达, 等. W 波段高速远距离无线实时通信[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(6):829-832. (QIN Chaoyi, XU Yuming, WANG Hada, et al. W-band high speed long distance wireless real-time communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(6):829-832.)
- [5] WELLS J. Faster than fiber: the future of multi-G/s wireless[J]. IEEE Microwave Magazine, 2009, 10(3):104-112.

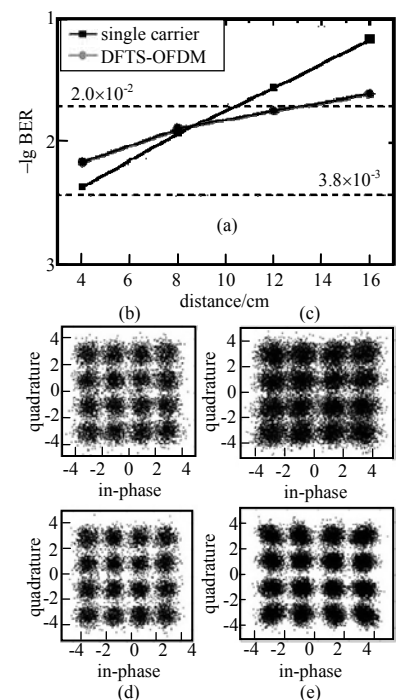


Fig.4 BER versus distance and constellations
图4 误码率-距离曲线与解调信号星座

- [6] ANDO I, TANIO M, ITO M, et al. Wireless D-band communication up to 60 Gbit/s with 64QAM using GaAs HEMT technology[C]// IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Austin, TX, USA: IEEE, 2016: 193–195.
- [7] LI Xinying, XU Yuming, XIAO Jiangnan, et al. A 2×2 MIMO optical wireless system at D-band[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2016.
- [8] 许育铭, 肖江南, 张自然, 等. 360 m 20 Gbit/s 的 W 波段无线通信系统[J]. 通信学报, 2014, 35(10): 17–22. (XU Yuming, XIAO Jiangnan, ZHANG Ziran, et al. 360 m 20 Gbit/s W-band wireless communication[J]. Journal on Communications, 2014, 35(10): 17–22.)
- [9] FRIIS H T. A note on a simple transmission formula[J]. Proceedings of the IRE, 1946, 34(5): 254–256.
- [10] CAO Z, LI F, OKONKWO C M, et al. Synchronized signaling delivery for broadband 60 GHz in-building optical wireless network based on digital frequency division multiplexing and digital Nyquist shaping[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 270–275.

作者简介:



王凯辉(1994–), 男, 浙江省嘉兴市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为毫米波通信. email: 16110720021@fudan.edu.cn.

余建军(1968–), 男, 湖南省益阳市人, 博士, 教授, 主要研究方向为高速光通信. email: jianjun@fudan.edu.cn.

中国兵工学会第二十届引信学术年会征文通知

为了进一步推动我国引信技术的繁荣发展, 提升引信行业各单位核心发展力、创新力、竞争力, 经研究决定, 中国兵工学会第二十届引信学术年会将于 2017 年第三季度召开, 现面向全国引信行业各单位的科技工作者征集论文。

一、年会主题: 引信技术创新驱动发展。

二、征文范围:

1) 军民融合发展战略中引信技术的机遇与挑战; 2) 引信基础理论、设计、开发、规范等的创新成果及发展趋势; 3) 引信开发、生产的新技术、新工艺、新体系、基础核心器件及部件的新进展; 4) 新武器、新平台、新威胁目标与引信技术; 5) 不敏感弹药引信技术; 6) 引信炸点及毁伤控制技术; 7) 引信抗干扰及强电磁对抗环境下新理论、新技术; 8) 引信靶场试验、测试及实战使用环境考核的新思路、新方法、新技术; 9) 引信产品在设计、开发、检验、贮存、使用(含全弹道环境、全寿命周期)等方面的安全性、可靠性问题和解决方法; 10) 科技新成果、新技术对引信技术发展的影响及技术融合的重点和发展方向。

三、征文要求: 本次年会召开前将评选出优秀论文, 请各单位投稿的作者按下列要求认真准备论文。

1) 论文需贴近本次年会议题, 有较强的学术性、针对性和前瞻性;

2) 论文内容事实准确, 观点明确, 条理清楚, 数据可靠, 未在国内正式出版物上发表过;

3) 作者提交的论文必须通过所在单位的保密审查, 文责自负, 论文内容不得涉密;

4) 论文应包括: 题目, 作者名, 单位名, 所在地, 邮编, 中文摘要, 中文关键词, 正文, 参考文献, 作者简介(包含单位名称、详细通信地址、邮政编码、固定电话和手机号码);

5) 排版要求如下: 纸张大小: A4, 页面设置: 上边距 2.5 cm, 下边距 2 cm, 左边距 2.5 cm, 右边距 2.5 cm, 页眉 1.5 cm, 页脚 1.75 cm; 文档网格: 选择“只指定行网格”每页 45 行。论文模板参见 www.tcykz.com 网站“读者园地”栏中的“引信学术年会论文模板”。为方便排版, 请各位作者严格按照模板提交论文。具体方法: 下载模板——清除原文格式——粘贴到模板。论文格式按照科技论文标准规范, 要求用 Word 2003 及以上版本软件排版。

四、投稿须知事项:

根据 2016 年引信专业委员会工作会议纪要的精神, 本次年会将对所征集到的论文进行优秀论文评选活动, 并遴选出部分具有代表性优秀论文在大会上进行交流。优秀论文评选完成后还将编辑出版《第二十届引信学术年会论文集》, 并向《兵工学报》、《探测与控制学报》等国内核心期刊推荐发表。故请论文作者务必于 2017 年 5 月 30 日前请将论文全文电子版以附件形式发送至年会电子邮箱: tcykz@263.net, 邮件标题格式为“论文提交—xxx(论文题目)—xxx(作者姓名)—xxx(作者单位)”。

五、主办单位及联系方式:

主办单位: 中国兵工学会引信专业委员会; 机电动态控制重点实验室; 解放军军械工程学院弹药保障与安全评估军队重点实验室

承办单位: 《探测与控制学报》编辑部

通信地址: 西安市雁塔区吉祥路 99 号, 邮编: 710065

联系人: 刘云 13659266136 029-88156201 029-88156204

六、年会举办的具体时间和地址另行通知。

中国兵工学会引信专业委员会

2017 年 2 月 15 日