

文章编号: 2095-4980(2019)01-0152-06

基于 USRP 的 NB-IoT/FSK 异构物联网系统实现

曾冠铭, 梁智彪, 陈 翔*

(中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 511400)

摘 要: 窄带物联网(NB-IoT)技术因具备广域覆盖、低功耗、海量用户接入的优点, 成为当前广域物联网的主流技术, 但单一的 NB-IoT 组网模式在某些极端功率受限环境(如水表井、地下车库等深度覆盖区域)仍会出现覆盖不足以及终端耗电大的问题。针对传统应用场景下的 NB-IoT 单独组网方式的不足, 提出一种 NB-IoT/FSK 混合异构组网广域物联网架构, 该架构能够借助频移键控(FSK)调制的较低解调门限进一步提高混合网络的覆盖范围, 降低最末端终端节点功耗, 从而实现深度覆盖下更多终端用户接入能力。使用通用软件无线电外设(USRP)平台搭建了该异构网演示系统, 模拟了物联网智能水表的应用场景, 仿真与实际的简单外场测试验证证明了该异构组网架构的可行性与优良性能。

关键词: 窄带物联网; 频移键控(FSK); 异构网; 通用软件无线电外设(USRP)

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0152

Implementation of NB-IoT/FSK heterogeneous IoT system based on USRP

ZENG Guanming, LIANG Zhibiao, CHEN Xiang*

(School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 511400, China)

Abstract: With the advantages of wide coverage, low power consumption, massive user access, Narrow Band Internet of Things(NB-IoT) has become one of the mainstream technologies of wide area IoT. Nevertheless, a single NB-IoT network in the environment with power extremely constrained(such as wells, underground garage in demand of deep coverage) will still have problems of weak coverage and large power consumption of end nodes. Due to the shortage of NB-IoT single network in traditional application scenarios, a hybrid NB-IoT/FSK heterogeneous network architecture is proposed. With lower demodulation threshold of Frequency-Shift Keying(FSK), it can further improve the coverage of the hybrid network, reduce the end node power consumption, so as to realize more terminals' access under the requirement of deep coverage. And then Universal Software Radio Peripheral(USRP), the software defined radio platform, is adopted to build the heterogeneous network demo system and simulate the scenario of intelligent water meter reading. By simple simulations and actual field test, this heterogeneous network is proved to be feasible and have good performance.

Keywords: Narrow Band Internet of Things; Frequency-Shift Keying; heterogeneous network; Universal Software Radio Peripheral

随着移动通信技术的不断发展, 万物互联已成为必然趋势。当前的通信网络包括一些高速率业务以及低速率业务, 其中以物联网应用为代表的低速率业务还没有较为成熟的蜂窝技术来提供支持。然而到 2021 年, 物联网终端数量将迅速达到互联网终端的 2 倍以上, 全球物联网终端年均复合增长率将达 20%以上^[1], 可见低速率通信业务需求量是非常庞大的。为了适应低速率业务的特点和需求, 窄带物联网(NB-IoT)应运而生, 其标准核心协议于 2016 年 6 月 16 日冻结。NB-IoT 是一种由 3GPP 定义的基于蜂窝网络的窄带物联网技术, 主要用于低功耗广域网, 并具备广覆盖, 多接入, 低功耗等优势^[2-4]。在智能水表等应用中, 由于井盖对信号的衰减、复杂的地下环境干扰, 基站到终端信号传输链路往往存在较为恶劣的信道环境。其次, 为了实现长时间的续航, 水

收稿日期: 2017-11-22; 修回日期: 2017-12-18

基金项目: 国家重点研发计划“ICT 一体化 5G 开放网络架构研究”资助项目(2016YFE0122900-3); 2016 教育部-NI 产学研合作协同育人项目-创新创业联合基金资助项目(201601011054); 2017 国家级大学生创新创业训练计划项目资助项目(201710558105)

*通信作者: 陈 翔 email:chenxiang@mail.sysu.edu.cn

表需要有较低的功耗。另外，在智能抄表等物联网应用中，网络也需要容纳海量设备的接入。NB-IoT 致力于解决以上问题。当前 NB-IoT 的组网分为 5 个部分，分别是 NB-IoT 终端、NB-IoT 基站、NB-IoT 核心网、NB-IoT 云平台、垂直行业中心^[5]。其中，NB-IoT 终端与 NB-IoT 基站大多直接建立连接以进行数据的交互。而在当前的物联网应用中，通常使用异构网来实现终端设备与基站的通信。如，一些农区远程监控系统、城市智慧路灯系统、智能水表系统均采用了 Zigbee+4G/3G/GPRS/CDMA 异构网的组网方案^[6-8]；一些油气生产系统采用了 LTE230 结合 802.11 网桥的异构网组网方案^[9]。但是，这类异构网络不足以很好地适应如水表井、地下车库等功耗极端受限、广域深度覆盖的场景。同时，单一的 NB-IoT 网络在这种场景下也容易出现覆盖不足以及终端耗电大的问题，从而无法很好地满足这种场景下的应用需求。

本文提出了一种 NB-IoT/FSK 异构网系统架构，该架构结合了 NB-IoT 及异构网两者的优势，主要用于水表等物联网设备深度覆盖的应用场景，可进一步提高 NB-IoT 网络的覆盖广度、降低终端功耗、增加终端接入量。同时，本文进一步描述了 FSK 网络的拓扑结构、工作机制以及 NB-IoT 链路、FSK 链路系统框图。鉴于软件无线电 USRP 具备较强的开发灵活性、移植的兼容性，本文基于该平台搭建了一套 NB-IoT/FSK 异构网演示系统，从算法仿真到实际测试充分验证了所提方案的优良特性。

1 基于 NB-IoT/FSK 的异构组网结构与协议

1.1 NB-IoT/FSK 异构网架构

如图 1 所示，NB-IoT/FSK 异构网由 NB-IoT 网络、FSK 网络组成，其中 NB-IoT 网络具备一个基站端、多个用户端，设备之间按照传统的星状方式组网；FSK 网络具备一个锚节点、多个子节点，节点之间采用链状方式组网。FSK 网络通过子节点的逐跳转发来实现锚节点与任意一个子节点的通信，子节点采用数据驱动的工作机制，仅当接收到相邻节点发送的信号时才触发转发信号、上传数据等动作。2 个网络在锚节点处实现连接及数据的交互。实际运作中，基站通过发送信令来控制锚节点，锚节点再次发送信令来控制子节点；同时，锚节点收集各个子节点的上行数据，并上传到基站，从而实现基站对众多子节点的分层控制以及数据收集。

以智能水表应用场景为例，子节点为各个水表终端，具备 FSK 信号的收发能力。锚节点为水表局域网的控制中心，在水表子网络中发送控制信令，并接收各个水表上传的数据。同时锚节点也是 NB-IoT 网络的用户端，把收集到的数据统一上传到 NB-IoT 蜂窝网络基站。

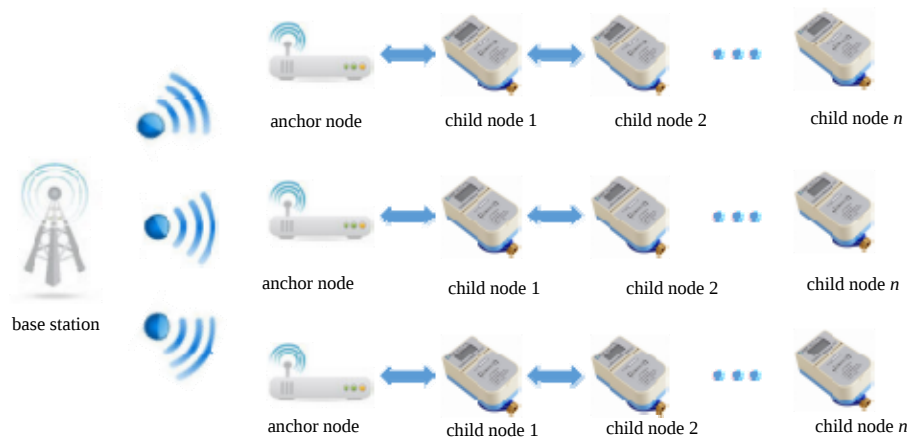


Fig.1 Architecture of NB-IoT/FSK heterogeneous network

图 1 NB-IoT/FSK 异构网网络架构

在一些要求实现极低功耗下广域极限覆盖的应用场景，NB-IoT/FSK 异构网有着更大的优势。相比于终端直接发送信号到达基站，该异构网允许终端发送信号到各个锚节点，从而进一步降低发送功率以及功耗，更好地适应终端功耗要求苛刻的场景。同时，基站也不需要发送信号到达各个终端，只需要发送到位于地面上的锚节点，从而进一步提高覆盖广度，使智能水表应用在一些蜂窝盲区成为可能。另外，在 NB-IoT 单网络中，可能存在整个网络中的个别节点由于所处环境的特殊性而无法建立或时常失去与基站的连接，异构网通过建立各终端与相邻终端节点的路由，使得网络各节点得到兼顾，提高各个终端连接的可靠性。另一方面，异构网通过层级结构，使基站通过锚节点来间接控制各个终端，大大减少了信令的开销，降低了 NB-IoT 网络的连接复杂度，从而使得终端接入量得到进一步提升。

1.2 FSK 网络拓扑结构及工作机制

如图 2 所示, 为了最大限度地提高 FSK 网络的覆盖范围, 锚节点与子节点之间采用链式的拓扑结构, 节点之间采用逐跳传递的信号传输方式。相比于传统的子节点与锚节点直接进行数据交互的拓扑结构及工作机制, 这种方式通过节点之间的逐跳转发以及对信号的恢复和重建, 可以在相等的信号发射功率下实现更广的覆盖。

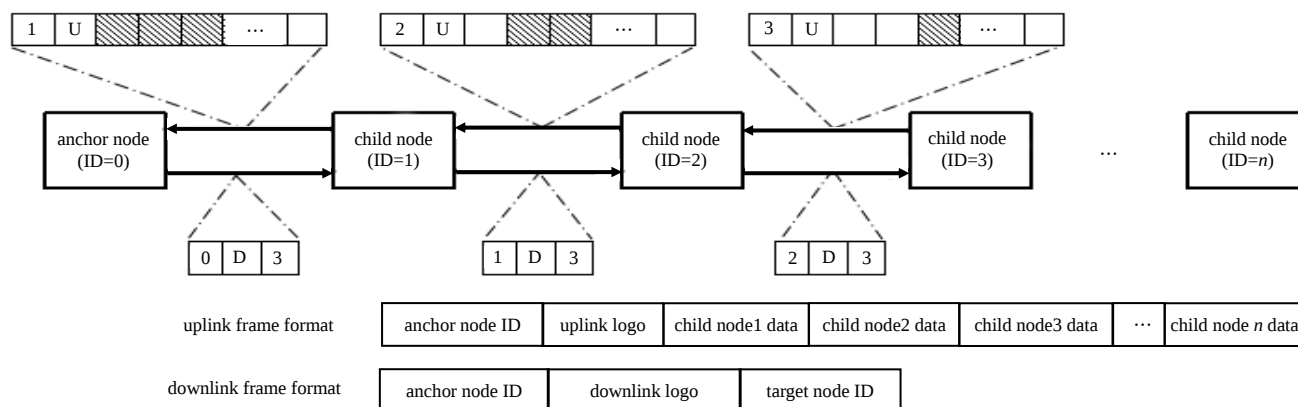


Fig.2 Topology and data stream of FSK network

图 2 FSK 网络拓扑结构及数据流

网络中所有锚节点、子节点均具有唯一的 ID 标识。下行帧包含的信息有: 发送该帧的源节点 ID、上下行标识、目标接收节点 ID; 上行帧包含的信息有: 源节点 ID、上下行标识、各个子节点上传的数据。目标接收节点 ID 指的是信令下达的最终接收节点, 该节点接收到下行信令后结束信令的下行传递并开始回传上行数据帧。上下行帧中的源节点 ID 以及上下行标识唯一指定了帧的接收对象, 从而确保数据包的链式传输。如图 2 所示, 每个节点只能接收其左侧相邻节点的下行帧以及右侧相邻节点的上行帧。

FSK 网络的工作流程如下:

1) 锚节点发送下行信令, 信令包括锚节点 ID, 下行标识以及目标节点 ID。

2) 子节点接收信号帧, 并根据源节点 ID、上下行标识以及目标接收节点 ID 来判断如何作出反应。若该帧为左侧相邻节点发送的下行帧, 且当前节点不是目标节点, 则需替换源节点 ID 为当前节点 ID 并重新发送该帧; 若该帧为左侧相邻节点发送的下行帧, 且接收节点是目标节点, 则需替换源节点 ID 为当前节点 ID, 替换下行标识为上行标识, 并把当前节点需上传的数据写入帧内并发送; 若该帧为右侧相邻节点发送的上行帧, 则需替换源节点 ID 为当前节点 ID, 写入当前节点需上传的数据并发送; 否则, 当前节点不作出任何反应。

3) 锚节点接收信号帧, 判断是否为其右侧相邻节点发送的上行帧。若是, 则从帧上获取各个节点的数据; 否则, 继续等待下一个信号帧的到来。

以目标接收节点 ID 等于 3 为例, 图 2 展示了 FSK 链式网络的数据流。

为了节省信令开销、降低功耗, FSK 网络各节点不单独发送确认(Acknowledgement, ACK)帧来提供确认。帧中的源节点 ID 相当于各节点的“签名”, 可以借此判断源节点所处的位置。只要在发送完一帧后, 继续获取下一帧的源节点 ID, 即可判断该帧是否被成功接收。因此, 各个节点的确认机制如下:

1) 发送信号帧;

2) 等待下一个信号帧的到来并获取其源节点 ID, 若该源节点为相邻接收节点, 则确认发送的信号帧已经被收到, 结束发送操作; 若长时间为没有收到含有相邻接收节点 ID 的信号帧, 则重复步骤 1)和 2)。

2 基于 USRP 的节点收发信机实现方案

2.1 NB-IoT 系统方案

NB-IoT 包括带内部署、保护带部署及独立部署 3 种部署模式。带内部署指利用长期演进(Long Term Evolution, LTE)载波中间的任何资源块; 保护带部署指利用 LTE 系统中边缘无用频带; 独立部署指利用单独的频带, 适合用于全球移动通信系统(Global System for Mobile communications, GSM)频段的重耕。本系统采用独立部署模式, 并根据现有的 NB-IoT 频段分配, 系统频段选择与中国移动保持一致。上行采用 890~900 MHz 频段, 下行采用 934~944 MHz 频段。在双工方式上, NB-IoT 系统支持频分双工(Frequency Division Duplexing,

FDD)半双工, 不支持时分双工(Time Division Duplexing, TDD)。在多址方式上, NB-IoT 下行采用正交频分多址接入(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), 上行采用单载波频分多址(Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access, SC-FDMA)^[10-11]。

如图 3 所示, NB-IoT 上下行系统收发基本流程大体一致。在信道编码上, 下行采用 1/3 码率的咬尾卷积码, 上行采用 1/3 码率的 Turbo 码; 在调制方式上, 下行采用 OFDM 调制, 上行采用 SC-FDMA 调制; 在同步、频偏纠正、信道均衡算法上, 上下行系统由于帧结构、参考序列的不同而有所不同。

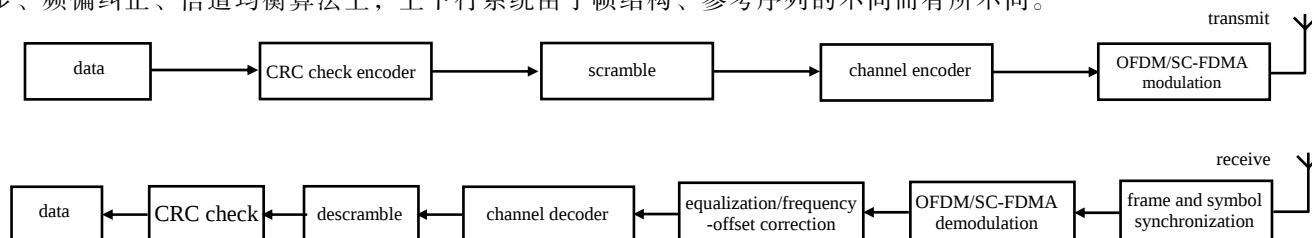


Fig.3 Physical layer link of NB-IoT system

图 3 NB-IoT 系统物理层链路

2.2 FSK 系统方案

如图 4 所示, 系统采用 2FSK 的调制方式, 上下行信号中心频率为 1 GHz, 卷积码编码码率为 1/2。FSK 的符号同步采用基于移动窗口的 FFT 算法实现^[12-13], 解调采用基于 FFT 变换的判决算法实现; 帧同步采用 44 位的巴克码序列自相关算法实现。

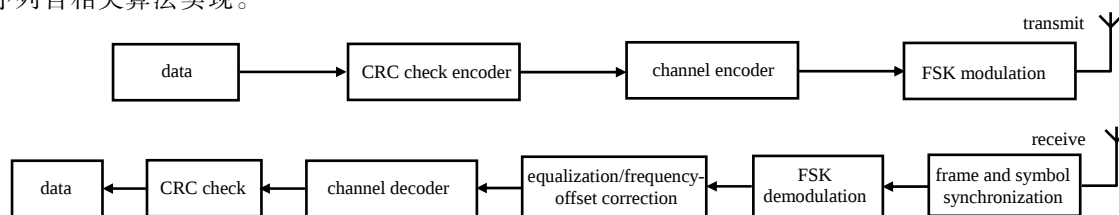


Fig.4 Physical layer link of FSK system

图 4 FSK 系统物理层链路

3 系统测试

3.1 链路性能仿真

对 NB-IoT 上下行链路、FSK 链路在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道下的误帧率进行仿真。为实现覆盖增强, NB-IoT 采用了重传机制, 重传次数最高可达 200。在信噪比为 -13 dB 的情况下, NB-IoT 上行误帧率为 99.34%, 下行误帧率为 99.02%, 这是 NB-IoT 系统能够正常工作的信噪比下限值。而 FSK 链路在相同信噪比之下误帧率为 7.54%, 这表明 FSK 更能适应极端覆盖下的应用场景。低信噪比 AWGN 信道下误帧率测试结果如图 5 所示。

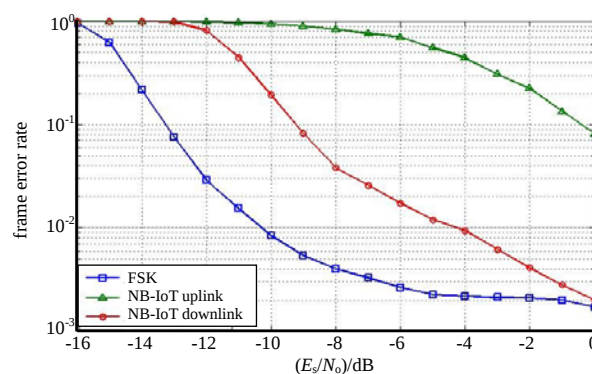


Fig.5 Simulation results of frame error rate of NB-IoT and FSK in AWGN channel

图 5 NB-IoT 和 FSK 链路在 AWGN 信道下的误帧率仿真结果

3.2 异构网功能测试

模拟智能水表的应用场景, 本文基于 USRP 平台编写了不同节点的收发信机程序, 并按照 NB-IoT/FSK 异构网架构对多个节点进行组合。文献[14-15]在异构网功能测试中, 以 1 台 USRP 设备作为水表锚节点, 3 台 USRP 设备作为水表子节点, 并把这 4 个节点放置于同一个房间内(如图 6 所示); 以 1 台 USRP 设备作为 NB-IoT 基站, 并将其放置于另一楼层的走廊尽头(如图 7 所示)。由于场地范围的限制, 为了体现网络广覆盖的特性, 测试中人为地调低了所有 USRP 信号发射功率, 为 3 dBm, 远小于 NB-IoT 协议规定的终端最大发射功率 23 dBm。锚节点水表应用面板如图 8 所示, 测试结果显示, 系统能够实现较低功率下的信号覆盖, 以及基站向水表子节点下达信令、水表子节点向基站上传水表数据等一系列的智能抄表应用下的操作。



Fig.6 Layout and demonstration scene of anchor node and sub nodes of water meter
图 6 水表锚节点、子节点布置及演示场景



Fig.7 Layout and demonstration scene of NB-IoT base station
图 7 NB-IoT 基站布置及演示场景

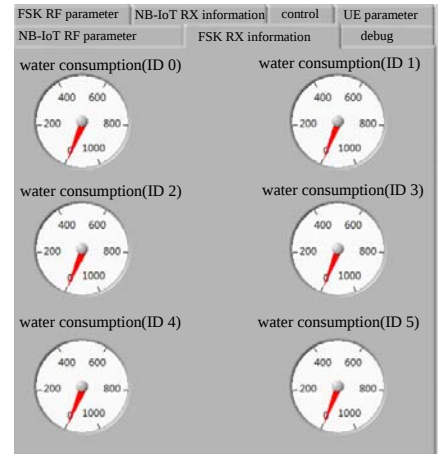


Fig.8 Water meter application panel of anchor node
图 8 锚节点水表应用面板

4 结论

本文提出了一种 NB-IoT/FSK 异构网的系统架构,该异构网架构适用于物联网极限覆盖、功耗极端受限的应用场景。该架构对 NB-IoT 网络的覆盖、功耗、接入量等性能提升有一定的实用价值。对 FSK 链路、NB-IoT 链路进行了 AWGN 信道下的性能仿真,结果显示,在相同的信噪比下,FSK 比 NB-IoT 有着更低的误帧率;使用 USRP 软件无线电搭建了一套 NB-IoT/FSK 异构网演示系统,模拟智能水表的物联网应用场景,实现了较低功率下的信号覆盖,以及基站对多个水表终端的数据收集,从而证明了该异构网组网方式的可行性。

参考文献:

- [1] 陈博,甘志辉. NB-IoT 网络商业价值及组网方案研究[J]. 移动通信, 2016,40(13):42-46,52. (CHEN Bo,GAN Zhihui. Research on commercial value and networking solution of NB-IoT network[J]. Mobile Communication, 2016,40(13):42-46,52.)
- [2] WANG Y P E,LIN X,ADHIKARY A,et al. A primer on 3GPP Narrowband Internet of Things(NB-IoT)[J]. IEEE Communications Magazine, 2016,55(3):117-123.
- [3] SINHA R S,WEI Y,HWANG S H. A survey on LPWA technology:LoRa and NB-IoT[J]. ICT Express, 2017,3(1):14-21.
- [4] LAURIDSEN M,KOVACS I Z,MOGENSEN P,et al. Coverage and capacity analysis of LTE-M and NB-IoT in a rural area[C]// Vehicular Technology Conference. Montreal,QC,Canada:IEEE, 2017:1-5.
- [5] 邹玉龙,丁晓进,王全全. NB-IoT 关键技术及应用前景[J]. 中兴通讯技术, 2017,23(1):43-46. (ZOU Yulong,DING Xiaojin,WANG Quanquan. Key technologies and application prospect for NB-IoT[J]. ZTE Technology, 2017,23(1):43-46.)
- [6] 陈红瑜. 基于智慧路灯及异构网通讯网关的智慧城市物联网解决方案[J]. 智能建筑电气技术, 2017,11(4):61-64. (CHEN Hongyu. Smart city IoT solutions based on intelligent street lighting and heterogeneous network communication gateway[J]. Intelligent Building Electrical Technology, 2017,11(4):61-64.)
- [7] 梁居宝. 基于异构网络融合的农业远程监控系统设计[D]. 北京:中国农业科学院, 2011. (LIANG Jubao. Design of telemonitoring system for agro-environmental information based on heterogeneous network integration[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.)
- [8] 毛涛,张生. 基于物联网的智能水表系统设计与实现[J]. 信息技术, 2017(7):175-178. (MAO Tao,ZHANG Sheng. Design and implementation of intelligent water meter based on the Internet of things technology[J]. Information Technology, 2017(7):175-178.)
- [9] 马建华,薛广民,万江飞,等. 异构无线网在油气生产物联网中的应用研究与实践[J]. 电信技术, 2014,1(6):42-46. (MA Jianhua,XUE Guangmin,WAN Jiangfei,et al. Application research and practice of heterogeneous wireless network in oil and gas production Internet of things[J]. Telecommunication Technology, 2014,1(6):42-46.)
- [10] 戴博,袁弋,余媛芳. 窄带物联网(NB-IoT)标准与关键技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017. (DAI Bo,YUAN Yi,YU Yuanfang. Narrow Band Internet of Things(NB-IoT) standards and key technologies[M]. Beijing:People's Post and Telecommunications Press, 2017.)
- [11] RATASUK R,VEJLGAARD B,MANGALVEDHE N,et al. NB-IoT system for M2M communication[C]// Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Doha,Qatar:IEEE, 2016:428-432.

- [12] 金文光,张正宇,唐少华. 2FSK 信号 DSTFT 解调算法中的同步新方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011,45(6):1027-1031. (JIN Wenguang,ZHANG Zhengyu,TANG Shaohua. New method for synchronization in DSTFT demodulation algorithm of 2FSK signal[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Edition), 2011,45(6):1027-1031.)
- [13] 刘虹霞. 基于谱分析原理实现 FSK 接收机的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2008. (LIU Hongxia. Research on implementation of FSK receiver based on spectral analysis theory[D]. Harbin,China:Harbin Engineering University, 2008.)
- [14] 杨小牛,楼才义,徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2001. (YANG Xiaoniu,LOU Caiyi,XU Jianliang. The principle and application of software radio[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2001.)
- [15] 姜宇柏,游思晴. 软件无线电原理与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007. (JIANG Yubo,YOU Siqing. The principle and engineering application of software radio[M]. Beijing:Machinery Industry Press, 2007.)

作者简介:



曾冠铭(1996-), 男, 广东省阳江市人, 在读本科生, 主要研究方向为物联网及无线通信.
email:zenggm3@mail2.sysu.edu.cn.

梁智彪(1996-), 男, 广州市人, 在读本科生, 主要研究方向为物联网及无线通信.

陈翔(1980-), 男, 长沙市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为无线与移动通信、卫星通信、物联网.

2019 年中国电子学会电路与系统分会混沌与非线性电路第二届学术年会征文通知

混沌作为一种复杂的非线性动力学行为, 在物理学、工程学、信息学及生物学等领域得到了广泛的研究。由于混沌内有的随机性、连续宽谱和对初值的极端敏感性等特点, 使其特别适用于图像加密及信号处理等方面。因此, 实现具有不同特性的混沌电路长期以来是研究人员所关注的热点。中国电子学会电路与系统分会混沌与非线性电路会议旨在汇聚国内从事相关学术研究和应用技术开发的专家学者、工程技术人员和在校研究生, 共同探讨研究混沌与非线性电路在各个领域的最新成果和学术热点, 促进高校之间的交流以及产学研进一步合作。

中国电子学会电路与系统分会混沌与非线性电路第二届学术年会将于 **2019 年 4 月 19 日-21 日** 在南京华东饭店召开。真诚地邀请混沌与非线性电路及相关领域的科研工作者莅临本次年会! 现将会议征文有关事项通知如下:

征文范围

本次年会诚征有关混沌与非线性电路及相关领域最新研究进展的学术论文(中英文均可)。征文方向主要包括(但不限于)以下主题:

1. 混沌机理
2. 非线性电路设计与建模
3. 非线性电路动力学分析
4. 混沌生成与电路实现
5. 混沌系统同步
6. 混沌调控与过程强化
7. 基于混沌的控制和优化
8. 基于混沌的密码学
9. 基于混沌的安全通信
10. 复杂生物系统中的建模和混沌
11. 复杂网络的动态系统
12. 混沌、分形和计算机科学
13. 光学混沌和应用
14. 激光动力学和非线性
15. 忆阻器原理、结构与实现
16. 忆阻模拟器电路实现
17. 基于忆阻器的混沌电路
18. 基于忆阻器的神经网络
19. 基于忆阻器的图像与视频信号处理
20. 基于忆阻器的先进存储器设计
21. 基于忆阻器的先进计算机体系结构
22. 混沌电路在人工智能方面的应用

更多详情登录网站: <http://www.iaeej.com>