

---

文章编号：2095-4980(2019)05-0914-05

## 一种C波段可调均衡器设计

王 辉，李树良，王 琦

(中国电子科技集团公司 第十四研究所，江苏 南京 210013)

**摘要：**提出一种基于螺旋陷波结构的可调均衡器设计，相比传统单枝节陷波结构，该结构增大了集总电感与集总电容效应，相同条件下实现了均衡器小型化设计。同时，设计3级陷波级联结构，结合金丝键合工艺选择不同级联结构，实现均衡量可调，并给出了均衡器设计实例。均衡器工作频率为2~8 GHz，由3个级联的螺旋陷波单元构成，采用CLTE-LC基片，厚度为0.254 mm，均衡器整体尺寸为20 mm×15 mm×0.254 mm。仿真结果显示，该均衡器均衡量有1.8 dB, 3.6 dB, 5.4 dB 3种可调模式，频带内回波损耗小于-15 dB。

**关键词：**螺旋陷波结构；可调均衡器；小型化

中图分类号：TN958.92

文献标志码：A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0914

## Design of adjustable equalizer based on spiral resonance structure

WANG Hui, LI Shuliang, WANG Qi

(The 14th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Nanjing Jiangsu 210013, China)

**Abstract:** This paper presents an adjustable equalizer based on spiral resonance structure, which realize miniaturization of equalizer design by increasing its equivalent capacitance and inductance under same circumstances compared with traditional single resonance structure. At the same time, three notch resonance units are designed for adjustable equilibrium quantity applied by wire bonding technique. An example of equalizer design is provided, which operates at 2~8 GHz and consists of three notch resonance units. CLTE-LC plate is applied, with 0.254 mm of thickness. The whole size of the equalizer is 20 mm×15 mm×0.254 mm. Simulation results indicate that the return losses are less than -15 dB in band, and three adjustable equilibrium quantities are achieved which are 1.8 dB, 3.6 dB, 5.4 dB respectively.

**Keywords:** spiral notch resonance; adjustable equalizer; miniaturization

增益均衡器是进行增益补偿的器件，多采用无源形式实现。随着雷达、微波通信、卫星通信、移动通信等技术的不断发展，对微波宽带信号传输的幅度频响平坦性有更高的要求。同时，为补偿瞬时大带宽雷达对宽带信号频响特性，在发射通道、接收通道都需配平宽带信号幅度频响，以减少微波传输幅度误差，提高信号脉冲压缩的质量<sup>[1-2]</sup>。在用于瞬时大带宽雷达的延时移相器中，对于高位的延时路与基准路的损耗频响不一致，可在基准路用衰减器和均衡器来配平延时路大损耗位的幅度频响，提高延时移相器的总传输频响质量<sup>[3]</sup>。以上这些，都对微波幅度均衡器提出了新的性能要求，主要有：幅度频响特性可准确设计；幅度衰减范围可调；端口驻波小。

本文提出一种基于螺旋陷波结构的小型化可调均衡器设计。该均衡器与传统单枝节均衡器相比，主要的改进在于陷波枝节采用螺旋接地结构，同时级联多个可调陷波枝节，根据均衡量采用金丝键合不同级联陷波结构，达到均衡量可调的效果。

### 1 均衡器的工作原理

陷波结构有多种形式，图1是一种螺旋拓扑结构的陷波单元。一端通过电阻与传输主路连接，另一端通过对地通孔短路。可以用二分之一波长谐振器等效为串联谐振。该陷波单元的典型等效电路如图2(a)所示。该电路由吸收电阻R和由L,C组成的串联谐振电路组成。网络两端为一特性阻抗为Z<sub>0</sub>输入输出端口。图2(b)为该陷波单元的频率响应特性曲线。

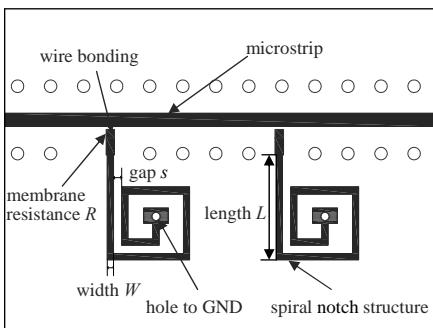


Fig.1 Schematic structure of the spiral notch unit  
图1 螺旋陷波单元结构示意图

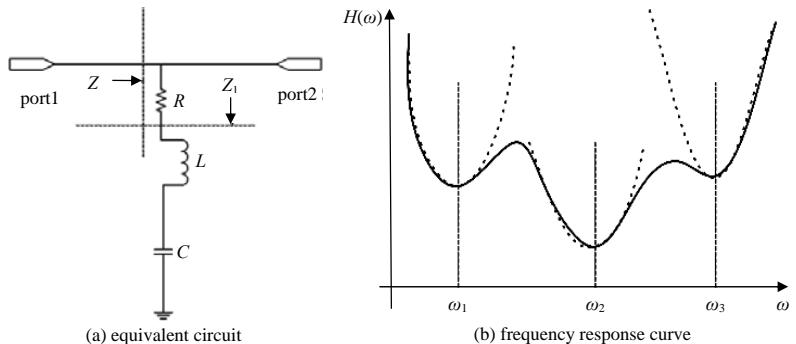


Fig.2 Equivalent circuit and frequency response curve of the spiral notch unit  
图2 螺旋陷波单元等效电路及频响曲线

图2(a)中,  $Z_1$  为串联谐振电路的阻抗, 其值为:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L \quad (1)$$

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L \quad (2)$$

式中  $\omega$  为谐振频率。

从陷波单元的频率响应可以看出, 二分之一波长谐振器具有多谐性。图2(a)中二端口网络可进一步等效为二端口网络中有一并联导纳, 如图3所示, 其中  $Z_0$  为传输线特性阻抗。

图3的二端口网络的  $S$  矩阵为:

$$S = \frac{1}{Y_1 + Y_2 + Y} \begin{pmatrix} Y_1 - Y_2 - Y & 2\sqrt{Y_1 Y_2} \\ 2\sqrt{Y_1 Y_2} & Y_2 - Y_1 - Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{Z_0}{2Z + Z_0} & \frac{2Z}{2Z + Z_0} \\ \frac{2Z}{2Z + Z_0} & -\frac{Z_0}{2Z + Z_0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$S_{11}(\omega) = -\frac{Z_0}{2Z + Z_0} = \frac{j\omega Z_0 C}{2(1 + j\omega RC - \omega^2 LC) + j\omega Z_0 C} \quad (4)$$

$$S_{21}(\omega) = -\frac{2Z}{2Z + Z_0} = \frac{2(1 + j\omega RC - \omega^2 LC)}{2(1 + j\omega RC - \omega^2 LC) + j\omega Z_0 C} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 陷波单元的谐振频率  $\omega$  由  $L$  和  $C$  决定。谐振时的最大衰减量由  $R$  决定。将多个陷波单元级联起来时, 对于图3的二端口网络, 各级的输入输出阻抗匹配时, 其  $S$  矩阵为:

$$S_{21}(\omega) = \prod_i^n S_{21}^i(\omega) \quad (6)$$

由式(6)可以看出, 任意形状的均衡曲线可以由多个陷波单元级联实现, 多个陷波单元级联后, 频率响应将具有更大带宽。一般采用3个陷波单元来实现需要的均衡曲线。

## 2 陷波单元设计与仿真

### 2.1 陷波枝节理论分析

图1为所提螺旋陷波单元结构。螺旋形结构以矩形绕线方式进行螺旋, 终端通过实心通孔接地。为避免集总电阻带来其他寄生参量, 减小因人工焊接电阻带来的误差, 本设计采用膜电阻代替集总电阻, 并结合金丝键合工艺端接至微带主路<sup>[4-5]</sup>。

螺旋陷波枝节整体体现为平面集总电感, 又通过接地形成了串联电感, 相比单枝节陷波枝节, 螺旋结构的电感值增大。螺旋线圈间形成分布电容, 同时线圈与地之间形成镜像电容, 因此相比单枝节陷波枝节, 螺旋陷波结构的电容值增大<sup>[6]</sup>。由于陷波枝节的电感值和电容值的增大, 相同陷波频率下陷波枝节的尺寸变小, 实现均衡器的小型化设计。

如图1所示, 通过调节螺旋结构的枝节长度  $L$ 、螺旋线宽  $W$  及间隙  $s$ , 等效改变电感和电容效应, 从而调节螺旋陷波结构的  $S$  参数。

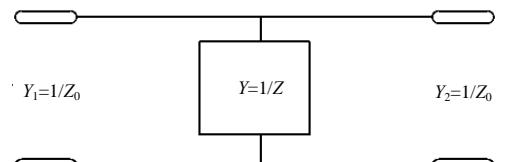


Fig.3 Equivalent dual ports network  
图3 等效二端口网络

## 2.2 螺旋陷波单元仿真设计

为设计合适的均衡器，在电磁仿真软件 CST 中建立如图 4 所示的陷波单元模型，通过调整陷波单元的结构参数对陷波频率、均衡量、带宽等参数进行调节控制。

### 2.2.1 均衡量控制

对图 1 中的陷波单元，通过调节加载电阻  $R$  的阻值大小，调节相应的均衡量，仿真结果如图 5 所示。由图可知，陷波单元的均衡量随电阻阻值  $R$  增大而减小。

### 2.2.2 陷波频率与带宽控制

对图 1 中的陷波单元，通过调整螺旋结构的总长度  $L$  和宽度  $W$  对陷波频率和带宽进行调整，仿真结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 可以看出，陷波单元的总长  $L$  从 4.5 mm 变化至 5.5 mm 时，陷波频率、带宽都变小。在一定范围内微调线圈线宽  $W$  由 0.2 mm 变化至 0.5 mm，由图 7 可以看出，陷波频率随  $W$  增大而减小，带宽则随  $W$  增大而增大。调整陷波结构的绕线间距  $s$ ，对模型进行仿真，结构如图 8 所示。可见，在一定范围内，间距  $s$  由 0.2 mm 变化至 0.5 mm，对陷波频率和带宽几乎没有影响。

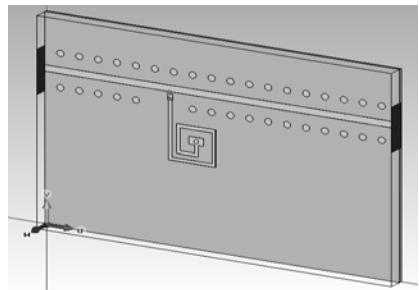


Fig.4 Simulation model of the spiral notch unit  
图 4 陷波单元仿真模型

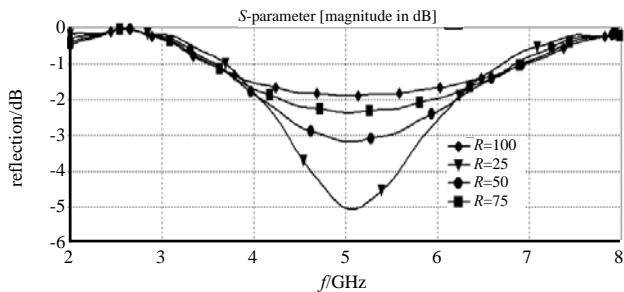


Fig.5 Influence of membrane resistance  $R$  on the equilibrium quantity  
图 5 膜电阻  $R$  对均衡量的影响

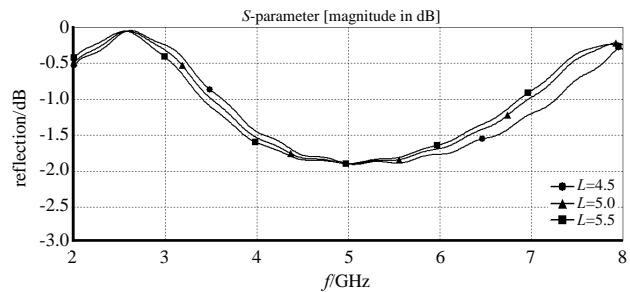


Fig.6 Influence of change of  $L$  on notch frequency and bandwidth  
图 6 长度  $L$  变化对陷波频率和带宽的影响

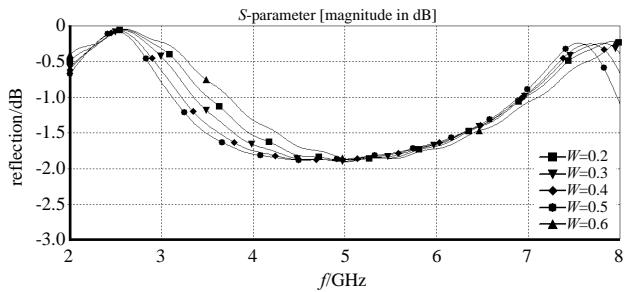


Fig.7 Influence of change of  $W$  on notch frequency and bandwidth  
图 7 宽度  $W$  变化对陷波频率和带宽的影响

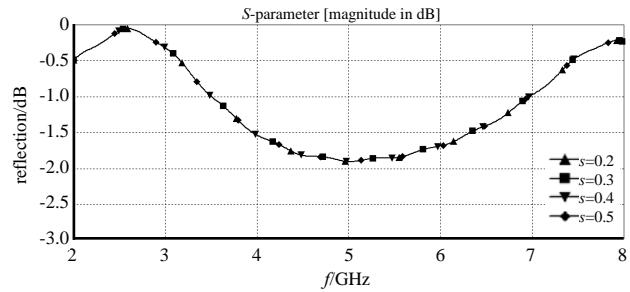


Fig.8 Influence of gap  $s$  on notch frequency and bandwidth  
图 8 调节绕线间距  $s$  对陷波频率和带宽的影响

为分析金丝键合工艺中人为键和误差对级联结构的影响，对可调均衡器结构的键合金丝进行仿真分析<sup>[7-8]</sup>。通过仿真键合金丝的不同跨距及拱高，得到仿真结果如图 9、10 所示。金丝拱高由 0.10 mm→0.15 mm→0.20 mm 变化时，对级联结构性能几乎无影响。键合金丝跨距由 0.3 mm→0.4 mm→0.5 mm 变化时，对级联结构也几乎无影响。因此，该可调均衡器对金丝键合工艺误差不敏感，符合工程使用要求。

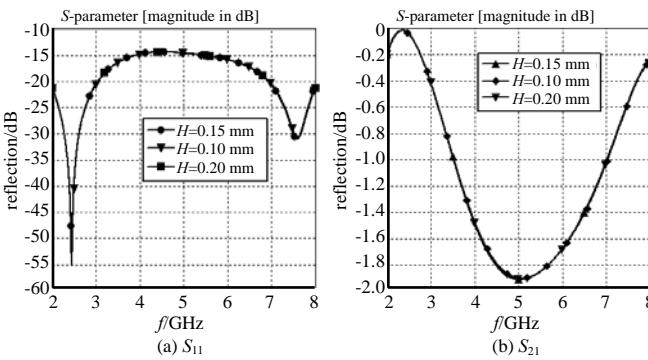


Fig.9 Influence curves of arch height of wire bonding on cascaded structure  
图 9 键和金丝拱高对级联结构的影响曲线

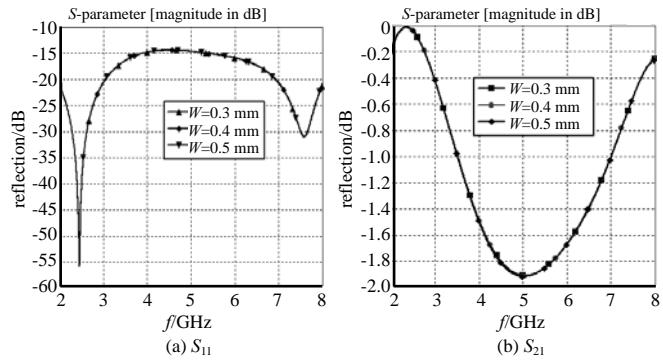


Fig.10 Influence curves of span of wire bonding on cascaded structure  
图 10 键和金丝跨距对级联结构的影响曲线

### 3 可调均衡器设计

将上述陷波单元级联起来，在 CST 中进行仿真。基板选用 CLTE-LC，相对介电常数为 2.94，厚度为 0.254 mm。传输线选用微带线，陷波单元与主传输线间加载薄膜电阻。CST 中的仿真模型如图 11 所示。

实际均衡器使用中，组件不同的通道经常需要不同均衡量的均衡器实现幅度均衡。若采用定制器材方式采购不同型号的均衡器满足调试需求，则成本较高且周期长。为了解决这一问题，本文提出可调式的均衡器设计。均衡器由陷波单元通过级联方式组成，通过金丝键合工艺键合不同级联陷波结构，选择不同的均衡量级，实现均衡量可调。本文设计

3 级螺旋陷波级联，整体尺寸为 20 mm × 15 mm × 0.5 mm。仿真结果如图 12~13 所示。可以看出，2~8 GHz 频段内，键合 1 级陷波结构，均衡量约为 1.8 dB，端口反射系数小于 -15 dB；键合 2 级陷波结构，均衡量约为 3.6 dB，端口反射系数小于 -20 dB；键合 3 级陷波结构，均衡量约为 5.4 dB，端口反射系数小于 -15 dB。通过上述仿真分析，金丝键合不同级数陷波结构，实现了均衡器的均衡量精确可调，且端口反射系数良好，满足工程使用需要。

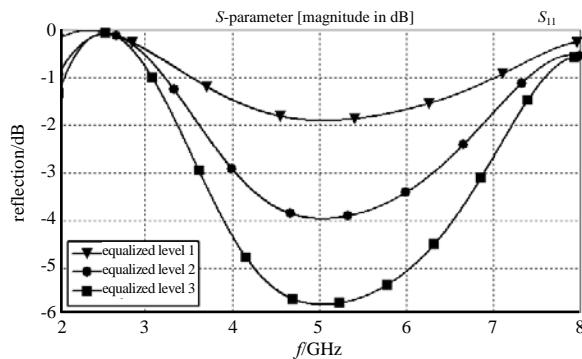


Fig.12 Equilibrium quantity of different cascaded structures  
图 12 不同级联结构下均衡量

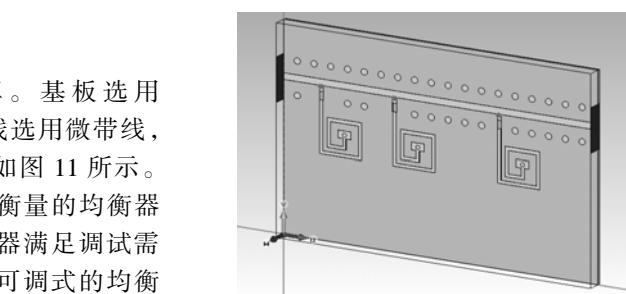


Fig.11 Cascaded spiral notch structure  
图 11 级联螺旋陷波结构

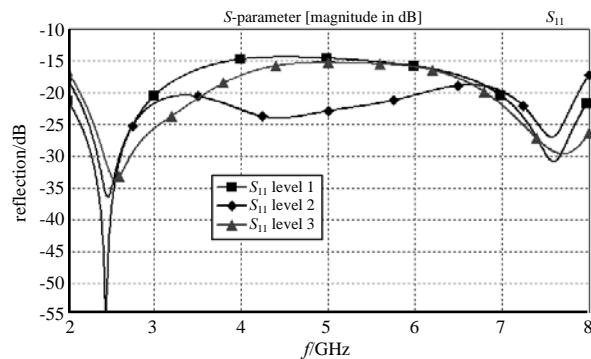


Fig.13 Port reflection coefficient of different cascaded structures  
图 13 不同级联结构的端口反射系数

### 4 结论

本文设计了一种新型螺旋陷波结构单元，相比传统单枝节均衡器设计，枝节等效集总电感和电容增大，相同指标下均衡器可实现小型化设计。该均衡器工作在 2~8 GHz，尺寸约为 20 mm × 15 mm × 0.5 mm，通过金丝键合工艺键合不同级联陷波结构，选择不同的均衡量级，提供 1.8 dB, 3.6 dB, 5.4 dB 三种可调均衡量。该可调均衡器设计性能指标满足工程应用要求，且使用板材为常见微波多层板，适合组件设计初期加入该结构，方便后期调试，具有成本低，调试简单，尺寸小型化的重要意义。同时，根据本设计，后期可调整陷波单元结构和级联数目，实现不同频段和均衡量的均衡器设计，具有重要的指导意义。

### 参考文献：

- [1] 赵志远,朱璇,周学全. 基于  $\lambda/4$  和非对称  $\lambda/2$  谐振器的三阶微带滤波器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(6):997–1003. (ZHAO Zhizhan,ZHU Xuan,ZHOU Xuequan. Three-pole microstrip bandpass filters with high selectivity using mixed  $\lambda/4$  and asymmetric  $\lambda/2$  resonators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):997–1003.)
- [2] 王国栋,华伟. 一种宽带小型化微波增益均衡器设计[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014,51(4):764–768. (WANG Guodong,HUA Wei. Design of a compact broadband microwave gain equalizer[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2014,51(4):764–768.)
- [3] 杨林川,张德伟,周东方. 一种 Ku 波段微波相位均衡器的设计[J]. 现代雷达, 2014,36(5):78–81. (YANG Linchuan, ZHANG Dewei,ZHOU Dongfang. Design of a Ku band microwave phase equalizer[J]. Modern Radar. 2014,36(5):78–81.)
- [4] 郑小雨,菅春晓,刘洛琨,等. 微带功率均衡器设计研究[J]. 雷达科学与技术, 2015,13(5):543–548. (ZHENG Xiaoyu,JIAN Chunxiao,LIU Luokun,et al. Design of a microstrip power equalizer[J]. Radar Science and Technology, 2015,13(5):543–548.)
- [5] 黄辉. 宽带系统模拟均衡器的分析和设计[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (HUANG Hui. Analysis and design of analog equalizer for broadband systems[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)

- [ 6 ] 郎小元. 宽带小型化均衡器设计与建模研究[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (LANG Xiaoyuan. Research of design and modeling on broadband and compact equalizer[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)
- [ 7 ] 花证,陈健,张振北. 基于共地谐振枝节的 6~18 GHz 小型化微带均衡器[C]// 2018 年全国微波毫米波会议. 成都:中国电子学会, 2018:525~528. (HUA Zheng,CHEN Jian,ZHANG Zhenbei. 6~18 GHz miniaturized microstrip equalizer based on resonance branches with common ground[C]// 2018 National Conference on Microwave and Millimeter Wave. Chengdu,China:The Chinese Institute of Electronics, 2018:525~528.)
- [ 8 ] 刘波,崔洪波,苏海霞,等. 自动金丝键合参数的影响及其优化[J]. 电子工艺技术, 2017,38(2):102~106. (LIU Bo,CUI Hongbo,SU Haixia,et al. Influence and optimization of automatic gold wire bonding parameters[J]. Electronics Process Technology, 2017,38(2):102~106.)

#### 作者简介:



王 辉(1992-), 男, 安徽省淮南市人, 工程师, 主要研究方向为微波器件及电路.email: shyjn003@163.com.

李树良(1985-), 男, 河南省安阳市人, 高级工程师, 主要研究方向为微波器件及电路.

王 琦(1978-), 男, 江苏省溧阳市人, 高级工程师, 主要研究方向为微波器件及电路.

## International Workshop on Edge Intelligence and Computing for IoT Communications and Applications

November 16/17, 2019, joint with IoTaaS 2019, Xi'an, China

Nowadays, billions of IoT devices, e.g., sensors and RFIDs, arise around us providing not only computing intensive, but also delay-sensitive services, ranging from augmented/digital realities to distributed data analysis and artificial intelligence. Unfortunately, in many application scenarios, the low response latency for IoT services are achieved at the cost of computing-complexity that far exceeds the capabilities of IoT devices. To feed this trend, multiple computing paradigms emerge, such as mobile transparent computing, edge computing, fog computing and big data analytics based framework. These paradigms employ more resourceful edge devices, e.g., small-scale servers, smart phones and laptops, to assist the low-end IoT devices. By offloading the computing-intensive tasks to the edge devices, it is expected to converge the data collection at IoT devices and the data processing at edge devices to provision computing-intensive and delay-sensitive services. However, lots of issues remain in the application of edge computing which impede its flourish in IoTs.

This workshop will solicit original research and practical contributions which advance the computing offloading and edge intelligence regarding the architecture, technologies and applications. Surveys and state-of-the-art tutorials are also considered. This workshop aims to bring together the active researchers in this field to share their timely and solid works on the Edge Intelligence and Computing for IoT Communications and Applications. Through this forum, it is expected to provide a comprehensive overview on this topic and inspire more valuable research orientations.

Topics of Interest: The topics related to the Edge Intelligence and Computing for IoT Communications and Applications include (but are not limited to):

- Architecture design for edge computing and intelligence in IoTs
- Data-driven energy consumption and delay model of edge computing in IoTs
- QoS-aware computing offloading in IoTs
- Edge intelligence and computing software design in mobile IoTs
- The management of software in edge intelligence and computing for IoTs
- Communication protocol design for edge intelligence and computing in IoTs
- Convergence of energy harvesting and computing offloading in IoTs
- Security, privacy, integrity, and trust in IoT computing offloading
- Hardware design and prototyping for edge intelligence and computing in IoTs
- Testbeds and simulation platforms for edge intelligence and computing in IoTs
- Big data framework and analytical optimization for edge intelligence and computing in IoTs
- Key scenarios/applications for edge intelligence and computing in IoTs(e.g., connected vehicles). Green network design and optimization for IoT