

文章编号: 1672-2892(2010)06-0660-05

## 改进的多用户 OFDM 系统子载波和比特分配算法

李城鑫, 黄玉清, 李 强

(西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 针对多用户正交频分复用(OFDM)系统资源分配问题, 提出了一种改进的基于边缘自适应(MA)准则的子载波和比特分配算法。在采用比例公平准则为每个用户分配子载波集合基础上, 以用户速率最大者-最小者(Max-Min)子载波交换为原则进行子载波调整, 使用户功率递减同时兼顾用户的公平性; 通过对信道状态信息进行判断, 利用贪婪算法将用户子载波分配的比特取整, 以实现系统功率最小化。实验结果表明, 本文提出的改进次优算法的计算复杂度较传统分步算法稍高, 但仍远低于最优算法, 其系统性能得以提升, 且接近最优算法。

**关键词:** 正交频分复用; 子载波分配; 比特分配; 发射功率; 信道状态信息

**中图分类号:** TN919.6

**文献标识码:** A

## An improved subcarrier allocation and bit loading algorithm for multiuser OFDM system

LI Cheng-xin, HUANG Yu-qing, LI Qiang

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

**Abstract:** A scheme of Margin Adaptive(MA)-based improved subcarrier and bit allocation was proposed for resource allocation in multiuser Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) system. In order to decrease the transmit power of users and guarantee the fairness principle, subcarrier exchange for user Max-Min transmission rate was adopted as the principle, besides employing proportional fairness principle to allocate subcarriers for each user. Then, the bit was rounded by the greedy algorithm with the channel state information judgment, to obtain the minimized transmission power of the system. The analysis and simulation results show that the computational complexity of the proposed improved suboptimal algorithm is a little higher than that of the traditional step-by-step algorithm, but when compared to the optimal algorithm, the proposed algorithm is of almost the same performance and a far lower computational complexity.

**Key words:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing; subcarrier allocation; bit loading; transmission power; Channel State Information(CSI)

OFDM 作为下一代无线通信计划中的核心技术, 具有良好的抗码间干扰和抗频率选择性衰落等特性。通过与自适应技术相结合, 能够根据不同用户的服务质量(Quality of Service, QoS)要求和子载波的信道状态信息(CSI), 动态地分配子载波和数据比特, 达到提高频谱利用率的目的<sup>[1-4]</sup>。

在自适应 OFDM 系统中, 子载波、功率、速率都是可以优化使用的资源, 要达到系统最佳性能, 需对这些资源进行整体上的优化分配<sup>[5]</sup>。根据优化目标的不同, OFDM 自适应资源分配主要分为边缘自适应(Margin Adaptive, MA)和速率自适应(Rate Adaptive, RA)2 个准则。

MA 准则的目标是在传输速率和误比特率(Bit Error Rate, BER)一定的情况下使系统发射总功率最小。Hughes-Hartogs 等人根据该准则给出了单用户最优分配算法<sup>[6]</sup>, 同时, Wong 等人也在理论上给出了多用户最优分配方案<sup>[7]</sup>, 但都存在计算复杂度高的问题。在此基础上, Lee 等人和 Hou 等人分别给出了低复杂度的次优算法, 各自采用了阈值准则<sup>[8]</sup>和比例公平准则<sup>[9]</sup>的子载波分配算法为每个用户分配子载波集, 并在子载波上进行自适应

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2010-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10876035); 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室资助项目(ISN10-09)

调制,通过比特数的动态分配来减少发射功率。在应用自适应调制进行比特分配时, Lee 等人对 Hughes-Hartogs 算法进行改进,将比特取整后,在没考虑子载波的 CSI 情况下进行迭代,以达到目标比特数<sup>[8]</sup>。相对而言,目前这些算法还未能充分考虑多用户之间的公平性,造成一些用户占用信道条件好的子载波较多,而另外一些用户占用信道条件好的子载波少,甚至不占有。

RA 准则的目标是在发射功率和误码率一定的情况下使整个系统具有最大的吞吐量。Shen 等人依据该准则给出了子载波和功率分配算法<sup>[1]</sup>,但在比特分配过程中复杂度较高,需要大量的运算。Mohanram 等人对上述算法进行了改进,提出了一种子载波和功率联合分配的次优算法,简化了比特分配过程<sup>[10]</sup>。

在考虑系统可靠性的条件下,本文以 MA 准则为基础,给出一种改进的资源分配次优算法,该算法分为子载波分配和比特分配两个部分。首先,在基于比例公平准则进行子载波初始分配的基础上<sup>[9]</sup>,利用用户速率 Max-Min 子载波交换原则对子载波进行调整,在减少用户发射功率同时兼顾用户之间的公平性。然后,通过对 CSI 进行判断,采用贪婪算法以系统功率最小化为目标,将用户子载波分配的比特取整,进而达到优化系统的目的。

## 1 系统模型

在  $K$  个用户和  $N$  个子载波组成的下行链路 OFDM 系统中,假设每个子载波的带宽远小于信道的相干带宽,且通过专用反馈信道,所有用户的 CSI 都无错误、无时延地反馈给发射端。这样,系统可以对子载波和数据比特进行动态分配,进而对发射功率做出相应调整。

实际上,不同用户具有不同的 QoS 要求,那么,各个用户将使用不同的调制编码方式,故他们的接收功率也将有所差异。为了在接收端保证每个用户所需的 QoS,需要对每个用户的发射功率进行相应调整,即第  $k$  个用户在第  $n$  个子载波上发射功率可表示为<sup>[7,11]</sup>:

$$p_{k,n}(b_{k,n}) = \frac{f(b_{k,n})}{h_{k,n}^2} = \frac{\sigma^2(2^{b_{k,n}} - 1)\Gamma}{h_{k,n}^2} \quad (1)$$

式中:  $h_{k,n}$  为第  $k$  个用户在第  $n$  个子载波上的信道增益;  $b_{k,n} \in \{1, 2, \dots, M\}$  为第  $k$  个用户在第  $n$  个子载波上传输的比特数,  $M$  为每个子载波能够传输的最大比特数,且子载波对每个用户来说都是独占的;  $f(b_{k,n})$  为第  $k$  个用户在第  $n$  个子载波上接收  $b_{k,n}$  个比特所需的功率;  $\Gamma$  为信噪比差额,由目标误比特率和调制编码方式共同决定;  $\sigma^2$  为噪声功率。

为达到使整个 OFDM 系统的发射功率最小的目的,需要对所有用户的发射功率进行优化处理<sup>[7-8]</sup>,即:

$$P = \min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \delta_{k,n} p_{k,n} \quad (2)$$

且需要满足以下 3 个条件,即:

$$\begin{aligned} \forall k \in \{1, 2, \dots, K\}, \exists R_k = \sum_{n=1}^N \delta_{k,n} b_{k,n}, BER_{k,n} \leq BER_{k,0}; \\ \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, \exists \sum_{k=1}^K \delta_{k,n} = 1; \\ R_1 : R_2 : \dots : R_K = \gamma_1 : \gamma_2 : \dots : \gamma_K \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $R_k (k=1, 2, \dots, K)$  为第  $k$  个用户的数据传输速率;  $BER_{k,n}$  为第  $k$  个用户在第  $n$  个子载波上的瞬时 BER;  $BER_{k,0}$  为第  $k$  个用户的目标 BER 约束值;  $\delta_{k,n}$  为布尔常量,表示子载波和用户之间的占用关系,当  $\delta_{k,n}=1$  时,表示第  $k$  个用户占用第  $n$  个子载波,当  $\delta_{k,n}=0$  时,表示第  $k$  个用户未占用第  $n$  个子载波。

## 2 资源分配算法

### 2.1 子载波分配算法

在考虑用户间公平性原则的基础上,改进的子载波分配算法包括初始分配和子载波交换 2 个方面。采用比例公平准则对子载波进行初始分配<sup>[9]</sup>,然后以用户速率 Max-Min 子载波交换为原则对每个用户的子载波集进行调整,寻找最优的子载波分配。

第 1 步:初始分配。令  $A_k = \emptyset, R_k = 0, A = \{1, \dots, N\}, k = 1, 2, \dots, K$ ; 对  $k=1, 2, \dots, K$ , 找到子载波  $m$  满足  $m = \arg \max |h_{k,n}| (n \in A)$ , 同时,令  $A_k = A_k \cup \{m\}, A = A - \{m\}, R_k = R_{\text{total}} / N$  ( $R_{\text{total}}$  为每个 OFDM 符号包含的比特);

当  $A \neq \emptyset$  时, 找寻满足条件  $R_k / \gamma_k \leq R_i / \gamma_i (\forall k, i \in \{1, 2, \dots, K\})$  的用户  $k$ , 对于该用户, 找到满足  $m = \arg \max |h_{k,n}| (n \in A)$  子载波  $m$ , 同时令  $A_k = A_k \cup \{m\}, A = A - \{m\}, R_k = R_k + R_{\text{total}} / N$ , 并进行循环, 直到  $A = \emptyset$  [9]。

第 2 步: 子载波交换。在初始分配过程中, 可能造成对速率要求高的用户优先选择信道条件较好的子载波, 而对速率要求低的用户选择信道条件较差的子载波。因此, 为了在系统发射功率最小化的同时满足用户间公平性原则, 需要对子载波进行交换。综合考虑算法的复杂度和性能, 以用户速率 Max-Min 为判断准则对每个用户的子载波集进行调整, 即对速率要求最高的用户和对速率要求最低的用户之间的子载波进行交换, 从而达到优化资源的目的。

令  $C = \{1, 2, \dots, K\}$ , 当  $\|C\| > 1$  时, 该子载波交换算法实现过程描述如下:

1) 将  $R_k (k \in C)$  按降序排列, 分别选择其中的最大值和最小值所对应的用户  $i$  和  $j (i \neq j)$ 。

2) 对于所有  $n_i \in A_i$ , 计算出将其分配给用户  $j$  的功率减少量  $t(n_i) = p_{i,n_i}(R_{\text{total}} / N) - p_{j,n_i}(R_{\text{total}} / N)$ 。然后找出满足条件  $n_i^{\max} = \arg \max t(n_i) (n_i \in A_i)$  的  $n_i^{\max}$  值, 同时相应得出最大功率减少量  $t(n_i^{\max})$ 。

3) 对于所有  $n_j \in A_j$ , 计算出将其分配给用户  $i$  的功率减少量  $t(n_j) = p_{j,n_j}(R_{\text{total}} / N) - p_{i,n_j}(R_{\text{total}} / N)$ 。然后找出满足条件  $n_j^{\max} = \arg \max t(n_j) (n_j \in A_j)$  的  $n_j^{\max}$  值, 同时相应得出最大功率减少量  $t(n_j^{\max})$ 。

4) 计算出由最大减少量  $t(n_i^{\max})$  与最大减少量  $t(n_j^{\max})$  相加形成功率减少因式  $t(n_i^{\max}, n_j^{\max})$ 。如果  $t(n_i^{\max}, n_j^{\max}) \leq 0$ , 说明系统总的功率不能再减少, 令  $C = C - \{i\} - \{j\}$ , 结束此次分配, 然后转到步骤 5); 如果  $t(n_i^{\max}, n_j^{\max}) > 0$ , 则将  $A_i$  中的子载波  $n_i^{\max}$  和  $A_j$  中的子载波  $n_j^{\max}$  进行互换, 然后, 更新功率减小因式  $\{t(n_i^{\max}, n_j^{\max})\}$ , 同时令  $A_i = A_i \cup \{n_j^{\max}\}, A_i = A_i - \{n_i^{\max}\}, A_j = A_j \cup \{n_i^{\max}\}, A_j = A_j - \{n_j^{\max}\}$ , 并转到步骤 2)。

5) 循环这一部分, 直到  $\|C\| \leq 1$ , 则子载波分配结束。

其中,  $\|C\|$  表示集合  $C$  的势。

## 2.2 比特分配算法

子载波分配后, 通过自适应调制为每个用户的子载波动态分配比特数。采用单用户比特分配算法, 使每个用户发射功率最小来达到系统发射总功率最小的目的。

对于第  $k$  个用户分配到的第  $n$  个子载波, 其传输的比特数可以描述为 [8]:

$$b_{k,n} = 2 \log_2 h_{k,n} + \frac{R_{\text{total}}}{N} - \frac{2}{\|A_k\|} \sum_{m \in A_k} \log_2 h_{k,m} \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad \forall n \in A_k \quad (4)$$

对式(4)求得的比特数取整后, 通过对 CSI 进行判断, 利用贪婪算法逼近目标比特数。

比特分配算法的实现过程描述如下:

1) 通过式(4)计算出每个用户在各自分配的子载波上传输的比特数。

2) 令  $\hat{b}_{k,n} = \text{round}(b_{k,n})$ , 其中  $\forall n \in A_k$ , 同时设定  $\hat{b}_k = \sum_{n=1}^N \delta_{k,n} \hat{b}_{k,n}$ 。其中,  $\text{round}(\cdot)$  为四舍五入取整。

3)  $\forall k = 1, 2, \dots, K$ , 当  $\hat{b}_k \neq R_k$  时, 则

a) 如果  $\hat{b}_k < R_k$ , 找到满足条件  $m = \arg \min \Delta p_{k,n}(\hat{b}_{k,n} + 1) (n \in A_k)$  的  $m$  值, 令  $\hat{b}_{k,n} = \hat{b}_{k,n} + 1, \hat{b}_k = \hat{b}_k + 1$ 。

b) 如果  $\hat{b}_k > R_k$ , 找到满足条件  $m = \arg \max \Delta p_{k,n}(\hat{b}_{k,n}) (n \in A_k)$  的  $m$  值, 令  $\hat{b}_{k,n} = \hat{b}_{k,n} - 1, \hat{b}_k = \hat{b}_k - 1$ 。

c) 循环这一步直到对于所有的  $k (\forall k = 1, 2, \dots, K)$ , 都满足条件  $\hat{b}_k = R_k$ , 则分配结束。

其中  $\Delta p_{k,n} = p_{k,n}(b_{k,n}) - p_{k,n}(b_{k,n} - 1) = \frac{\sigma^2 \Gamma}{h_{k,n}^2} 2^{b_{k,n} - 1} (\Gamma = -\ln(5BER_{k,0})/1.6)$

## 3 实验结果与分析

为了验证改进算法的性能, 本节利用 Rec.ITU-RM.1225 的 IMT-2000 Vehicular A 六径瑞利衰落信道模型进行蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真实验分析, 其信道的详细参数如表 1 所示。

仿真中, 设置系统的传输带宽为 20 MHz, 载波频率为 2 GHz, 子载波数为 120, 每个 OFDM 符号包含 480 个比特(即每个子载波平均发送 4 个比特), 信道中 AWGN 的单边功率谱密度为 1, 所有用户的目标误比特率约束值均为  $10^{-3}$ , 子载波上可用的调制方式有 4QAM, 16QAM 和 64QAM, 且不引入信道编码。

3.1 改进比特算法的自适应性验证

为考察改进比特分配算法的自适应性, 本实验通过在单用户条件下, 随机产生一系列子信道及相应的信道传递函数, 进而得出每个子载波传输的比特数及相应的发射功率进行验证, 实验结果如图 1 所示。从图中可以看出, 在信道特性好时, 该信道的子载波采用高阶调制方式传输更多的比特; 在信道处于深度衰落时, 该信道的子载波采用低阶调制方式传输较少的比特甚至不传比特。由于不同的子载波在不同的衰落条件下传输不同的比特数, 传输功率也要相应随之改变; 在采用相同调制方式传输比特时, 信道特性好的子载波所需要的传输功率低, 反之亦然。实验结果表明, 该比特分配算法符合自适应 OFDM 技术的特征。

表 1 IMT-2000 Vehicular A 信道模型参数

Table1 Channel model parameters of IMT-2000 Vehicular A

multipath orders	delay/ns	relative path power/dB	speed/(km·h <sup>-1</sup> )
1	0	0	30
2	310.0	-1.0	
3	710.0	-9.0	
4	1 090.0	-10.0	
5	1 730.0	-15.0	
6	2 510.0	-20.0	

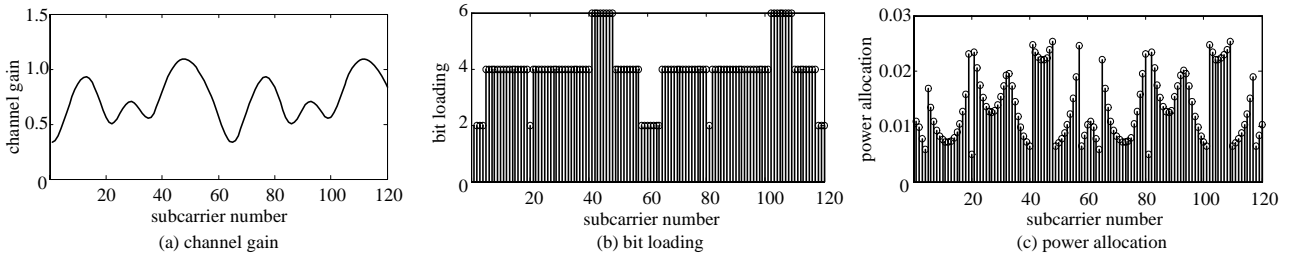


Fig.1 Simulation results

图 1 仿真结果

3.2 不同用户具有相同传输速率时算法的性能对比

本实验通过误比特率与平均比特信噪比之间的关系曲线来验证改进算法的性能。误比特率是衡量在规定时间内数据传输可靠性的指标, 在相同误比特率情况下, 所需的平均比特信噪比越高, 系统性能就越差。图 2 给出了用户数为 6, 且用户传输速率相同时 3 种算法的性能对比曲线。从图中可以看出, 当  $BER = 10^{-4}$  时, 改进算法较 Lee 算法有大于 1 dB 的性能提升, 与 Wong 等人提出的最优算法相比, 大约只有 0.3 dB 的差异, 但从表 2 可以看出, 该算法的复杂度却远低于 Wong 算法。其中,  $t$  表示迭代次数, 一般情况  $t < 10$ 。

表 2 联合子载波和比特分配算法的计算复杂度

Table2 Complexity of joint subcarrier and bit allocation algorithms

algorithm	order of operation
Wong's algorithm <sup>[7]</sup>	$O(KN^2) + O(B \times \text{Mlog}_2 N)$
Lee's algorithm <sup>[8]</sup>	$O(2KN) + O(\text{Mlog}_2 N + N)$
proposed algorithm	$O(3KN) + O(\text{Mlog}_2 N + t \times N)$

3.3 不同用户具有不同传输速率时算法的性能对比

为了进一步验证改进算法的性能, 图 3 给出用户数为 6, 用户传输速率的比例为 2:2:1:1:1:1 时 3 种算法的性能对比曲线。从图中可以看出, 改进算法较 Lee 算法同样有较大的性能提升, 且系统性能的优越性随着平均比特信噪比的增加而提高, 略低于 Wong 等人提出的最优算法。

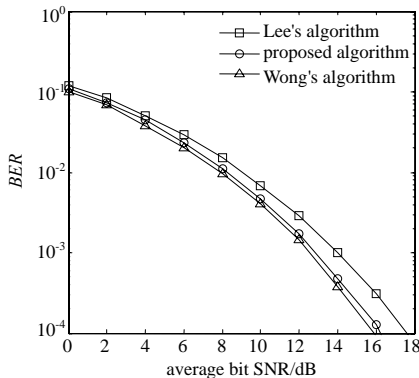


Fig.2 Performance comparison of different algorithms at the same transmission rate

图 2 用户具有相同传输速率时不同算法的性能对比曲线

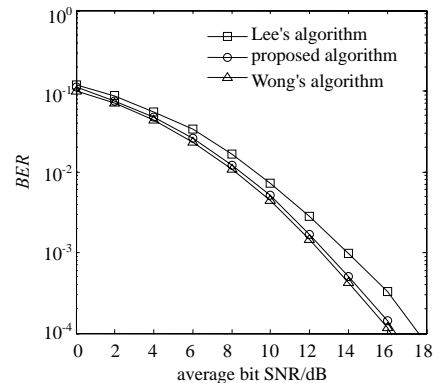


Fig.3 Performance comparison of different algorithms at different transmission rates

图 3 用户具有不同传输速率时不同算法的性能对比曲线

## 4 结论

本文给出了一种基于 MA 准则改进资源分配算法, 在保证满足每个用户的速率要求和 BER 限制要求下, 通过子载波分配和比特分配算法, 使得系统的发射总功率最小。实验表明, 该改进算法的性能较传统分步算法好, 并接近最优算法, 且计算复杂度远低于最优算法。

在理想信道信息获取的假设条件下, 采用改进算法的无线通信系统性能得以提高。然而, 实际的无线通信过程中, 由于受到信道的时变性、反馈链路的可靠性以及信道信息估计的准确性等因素的影响, 系统发射端并不能获得理想的信道状态信息。为此, 针对实际通信环境下部分信道状态信息未知时的资源分配算法还有待进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] Shen Z, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005,4(6):2726-2737.
- [2] 李姣军, 曾孝平, 张众发. 一种基于电力线通信的 OFDM 自适应比特与功率分配算法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(1):15-21. (LI Jiao-jun, ZENG Xiao-ping, ZHANG Zhong-fa. An adaptive bitloading and power allocation algorithm in OFDM system for powerline communication[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(1):15-21.)
- [3] 曾孝平, 赵铁军, 韩庆文. OFDM 自适应子载波功率分配算法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(5):343-346. (ZENG Xiao-ping, ZHAO Tie-jun, HAN Qing-wen. OFDM adaptive subcarrier power allocation algorithm[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(5):343-346.)
- [4] Sun Qiao-yun, Tian Hui, Wang Shuang, et al. Novel resource allocation algorithms for multiuser downlink MIMO-OFDMA of FuTURE B3G systems[J]. Progress in Natural Science, 2009,19(9):1141-1146.
- [5] 刘敏, 徐大专. OFDMA 系统下行链路自适应带宽与子载波分配方案[J]. 电子与信息学报, 2009,31(4):907-910. (Liu Min, Xu Da-zhuan. Adaptive bandwidth and sub-carrier allocation for OFDMA downlinks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009,31(4):907-910.)
- [6] Hughes-Hartogs D. Ensemble modern structure for imperfect transmission media:US,4731816[P]. 1988-03-15[2010-03-25].
- [7] Wong C Y, Cheng R S, Letaif K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 1999,17(10):1747-1758.
- [8] Lee C W, Jeon G J. An efficient adaptive modulation scheme for wireless OFDM systems[J]. ETRI Journal, 2007,29(4):445-451.
- [9] 侯利明, 林孝康. 基于 OFDM 技术的多用户子载波分配算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009,49(4):528-530. (HOU Li-ming, LIN Xiao-kang. Dynamic subcarrier allocation algorithm for multiuser OFDM-based networks[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology, 2009,49(4):528-530.)
- [10] Mohanram C, Bhashyam S. A sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM[J]. IEEE Communications Letters, 2005,9(8):685-687.
- [11] Wong I C, Shen Z, Evans B L, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems[C]// IEEE International Signal Processing Systems Workshop. Austin, Texas:[s.n.], 2004:1-6.

### 作者简介:



李城鑫(1984-), 男, 四川省武胜县人, 在读硕士研究生, 研究方向为无线通信、OFDM 技术。email:lcx19841014@163.com.

黄玉清(1962-), 女, 四川省三台县人, 教授, 主要研究方向为认知无线电技术、网络测控、智能控制。

李强(1982-), 男, 四川省资阳市人, 博士, 主要研究方向为信号检测与分析、无线测控。