

# 机会调度模式下的嵌套码研究

## Nested Codes in Opportunistic Scheduling Model

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2015) 05-0056-004

**摘要:** 将机会调度模式引入嵌套码体系, 通过各个收发节点与中继节点的信道状况自适应调整嵌套码的码速率, 可以增加信道状况好的链路传输的数据量, 提升无线网络的整体吞吐量。仿真结果表明, 相比传统非机会调度嵌套码而言, 机会调度嵌套码能够有效提升网络吞吐量和误比特性能。

**关键词:** 中继系统; 嵌套码; 机会调度; 吞吐量; 误比特率

**Abstract:** This paper introduces the concept of opportunistic scheduling in a nested coding system. In this scheme, adaptive rate nested codes are used according to channel conditions in order to increase the transmission load of the link while maintaining a good channel condition. In this way, network capacity is no longer constrained by the worst link, and the overall throughput of wireless networks is increased. Simulation shows that compared to traditional non-opportunistic scheduling nested coding, opportunistic scheduling nested coding increases throughput and reliability of single relay multicast relay networks.

**Key words:** relay system; nested codes; opportunistic scheduling; throughput; bit error rate

胡留军/HU Liujun  
许进/XU Jin

(中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳, 518057)  
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

网络的容量和可靠性。

### 1 网络编码系统模型

文章提出的方法主要针对典型组播单中继系统。系统由一个中继站和多个收发节点构成。各个收发节点既是信源节点也是目的节点。即各个收发节点都要通过中继将自己的信息发送给所有其他收发节点, 同时也接收所有其他收发节点发来的信息。典型的4收发节点组播单中继系统如图1所示<sup>[7]</sup>。

在该系统中采用的网络编码传输信息的过程如下: 4个收发节点(A, B, C, D)将各自的信息( $i_A, i_B, i_C, i_D$ )发送至中继节点r; 中继节点将收到的部分或全部信息进行网络编码; 中继节点r将网络编码后的信息广播

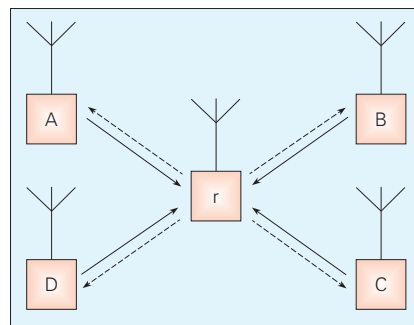
当前无线网络系统正经历对系统容量的需求提升及网络密集化的过程<sup>[1]</sup>。网络编码因能够采用较少的链路获取较大的网络容量而被广泛关注<sup>[2-3]</sup>。在传统网络编码中, 网络节点需要预知其他节点的边信息, 然而在实际情况下, 边信息往往很难获取<sup>[4]</sup>得到。

针对边信息获取难的问题, L. Xiao等将卷积码与网络编码相结合, 提出采用嵌套码的补偿方法来解决没有边信息情况下的网络编解码问题<sup>[5]</sup>。因此, 我们可以认为嵌套码可以进一步提高未来网络编码投入到实际应用的可行性。

在现有嵌套码体系下, 全网中的

所有链路采用相同的码速率。然而, 在无线通信网络场景下, 不同链路所受信道衰落各不相同。为了保证质量最差的链路具有可接受的可靠性, 全网所有链路都需要采用较低的传输速率。在这种情况下, 无线网络的容量瓶颈是通信质量最差的无线链路, 网络中信道质量好的无线链路得不到充分利用。

针对以上问题, 文章将机会调度机制<sup>[6]</sup>引入嵌套码体系。在典型无线组播单中继网络架构下, 基于信道状态信息, 通过动态选择参与网络编码的信源节点, 提升整个网络的容量。此外, 针对无线信道的时变特性, 文章还提出了在机会调度网络编码体系中引入可变码率的删余卷积码(RCPC)<sup>[6]</sup>来动态适配无线链路的信道质量, 从而进一步提升整个无线网



▲图1 网络编码系统模型

收稿日期: 2015-05-25  
网络出版时间: 2015-07-21

至各收发节点;各收发节点将从中继节点收到的信号解码,获取从其他收发节点传来的信息<sup>[8]</sup>。

## 2 机会调度与嵌套码的原理

### 2.1 嵌套码

嵌套码将卷积码与网络编码技术相结合,每个卷积码的编码矩阵相互线性独立,再将各个卷积码编码进行网络编码形成嵌套码。嵌套码的优势在于接收端仅通过嵌套码译码就可以获取组成该码的各个源节点的数据信息。

本系统中源节点通过相互线性独立的卷积码生成器产生编码数据包并发送至中继节点,中继节点进而对其中一部分接收信息进行嵌套编码<sup>[9-10]</sup>,数学表达式如下:

$$c_{nested} = i_1 G_1 \oplus i_2 G_2 \oplus \dots \oplus i_{|s|} G_{|s|} \\ = [i_1, i_2, \dots, i_{|s|}] [G_1, G_2, \dots, G_{|s|}]^T \quad (1)$$

其中,  $G_1, G_2, \dots, G_{|s|}$  表示相互线性独立的生成矩阵,  $i_1, i_2, \dots, i_{|s|}$  表示源节点数据包,  $\oplus$  表示异或操作。

嵌套码的设计依据以下准则:各节点的编码向量相互线性独立;合并后的嵌套码的码率小于1;避免使用恶性卷积码<sup>[11]</sup>。基于各节点的编码向量相互独立,可以降低嵌套码译码时对边信息的依赖,若码率大于1或者若源节点使用了恶性卷积码,将导致卷积码性能损失。

### 2.2 机会调度与RCPC码

网络模型中全部链路均为相互独立的衰落信道,在  $\mu$  时刻,源节点到中继节点的瞬时信噪比(SNR)可写为:

$$\gamma_{sr}(\mu) = \frac{P |h_{sr}(\mu)|^2}{\sigma_{sr}^2} \quad (2)$$

其中,  $P$  为发射功率,  $h_{sr}(\mu)$  为信道系数,  $\sigma_{sr}^2$  则为高斯白噪声的噪声方差。

中继节点将源到中继节点的瞬

时SNR设置为一组升序数组。 $r_k$  表示升序数组中第  $k$  个瞬时SNR,  $N_d$  表示目的节点的总数,共有  $N_i = N_d - k + 1$  个目的节点参与机会调度,  $k$  为调度等级。 $r_k$  为  $N_i$  个目的节点与中继节点的链路上的最小SNR。

参与机会调度的信源节点至中继节点的每单位带宽下的系统容量定义<sup>[7]</sup>:

$$C_{inst}^k = N_i \log_2(1 + r_k) \quad (3)$$

式(3)中,当  $N_i$  逐渐增大时,  $r_k$  的取值逐渐减小,因此可以通过选取合适的  $k$  值,使得式(3)表示的系统容量最大。

中继节点对调度到的节点进行异或操作,  $S_{os}$  表示参与机会调度的源节点的集合。因此,中继节点进行嵌套编码的表达式如下:

$$c_{nested}^{OS} = \bigoplus_{j \in S_{os}} i_j G_j \\ = [i_1, i_2, \dots, i_{|s|}] [G_1, G_2, \dots, G_{|s|}]^T \quad (4)$$

为了提高嵌套码的码率,中继节点采用RCPC编码。例如可采用码率1/3,约束长度为3的最佳距离谱(OVS)码作为母码。

### 2.3 译码算法

目的节点获取的软信息可以表示为:

$$\tilde{\tau} = c_{nested-os} + e \quad (5)$$

其中  $e$  表示噪声。进一步,以在目的节点  $d$  处为例,  $\tilde{\tau}$  可表示为:

$$\tilde{\tau} = \bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l \oplus \bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l + e \quad (6)$$

$k_d$  表示目的节点  $d$  的已知先验信息的节点的索引,  $\bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l$  表示目的节点已获取的信息。通过以上集合可推导表达式如下:

$$\tilde{\tau}_d = \hat{\tau} \oplus \bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l = \bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l + e \quad (7)$$

其中,

$$\bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l + e \quad (8)$$

表示目的节点  $d$  尚未获知的信

息。为了从未知信息中获得目的信息,嵌套码通过各行向量相互线性独立的编码矩阵  $[G_1, G_2, \dots, G_j, \dots, G_{|s|}]^T$  从  $\bigoplus_{l \in k_d} i_l G_l + e$  中获取目标源节点信息  $i_i$ 。

### 2.4 编码可达速率

文献[8]分析了有、无调度机制下的系统可达速率:

$$R = \left( \frac{T}{t} \right) \cdot W \cdot I(s, r, d) \quad (9)$$

$R$  表示系统的可达速率,  $T$  表示每个时隙的时间长度,  $t$  表示所有时隙的总的时长,  $W$  表示可用带宽,  $I(s, r, d)$  表示源节点  $s$  到目的节点  $d$  的互信息。

首先,各源节点使用相同的传输时隙  $T$ 。如图2(a)所示,当不采用机会调度时,由于要兼顾链路条件最差的那个节点,中继节点传输网络编码包需要用较低的码率,例如在图2(a)中用了3个时隙(3T)。在图2(b),由于采用了机会调度的机制,中继节点可根据不同的机会调度等级选择不同的时隙传输网络编码包。

由图2可以推导出有或者无机会调度的情况下系统传输网络编码包所需要的时隙数:

$$t_{withoutOS} = |S| T_{withoutOS} + 3T_{withoutOS} \quad (10)$$

$$t_{withOS} = |S| T_{withOS} + X \cdot T_{withOS} \\ (x = 3/2, 2, 5/2 \text{ or } 3) \quad (11)$$

整理可得:

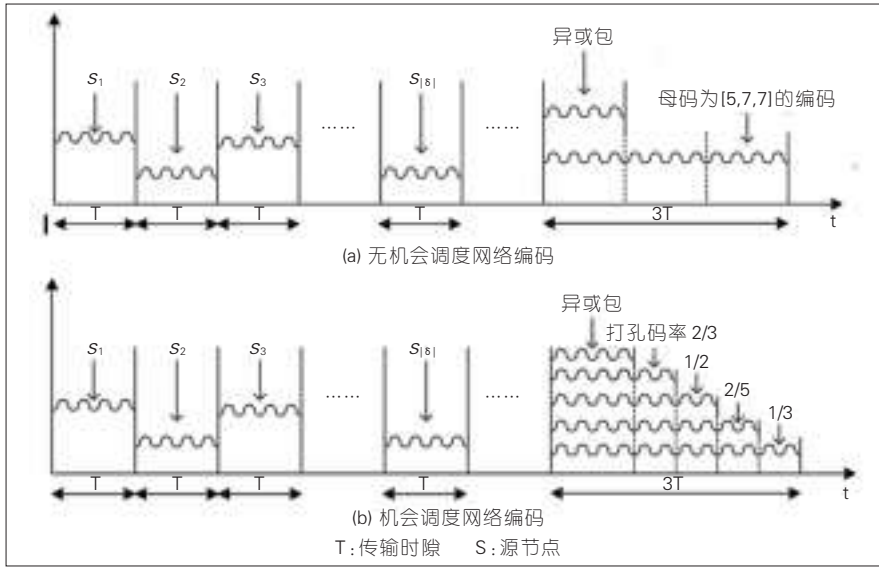
$$T_{withoutOS} = \frac{t_{withoutOS}}{|S| + 3} \quad (12)$$

$$T_{withOS} = \frac{t_{withOS}}{|S| + X} \\ (x = 3/2, 2, 5/2 \text{ or } 3) \quad (13)$$

其次,通过中继转发后源节点与目的节点之间的互信息  $I(s, r, d)$  可以表示为<sup>[9]</sup>:

$$I(s, r, d) = \log_2 \left( 1 + r_d + \frac{r_s r_d}{\left| \frac{\sigma_s^2}{s_s} + r_d + \frac{\sigma_d^2}{\sigma_d^2} \sum_{s_j \in |s|} r_{s_j} \right|} \right) \quad (14)$$

其中,  $s_e$  表示采用机会调度后源



▲图2 机会调度

节点的集合； $r_{sd} = |h_{sd}|^2 p_s / \sigma_d^2$ ， $r_{sr} = |h_{sr}|^2 p_s / \sigma_r^2$  和  $\sigma_{s_d}^2$  分别表示接收节点 d 的网络编码噪声方差。在文章所述的系统模型中，有  $|s_e|_{\max} = |s|$ ， $\sigma_{s_d}^2 = \sigma_d^2$ ，其中  $|s_e|_{\max}$  表示机会调度机制下最大的源节点集合中包含的节点数。在有机会调度和没有机会调度的情况下，源节点与目的节点之间的互信息分别表示为：

$$I_{withoutOS} = \log_2 \left( 1 + r_{sd} + \frac{r_{sr} r_{rd}^1}{|s| + r_{rd}^1 + \sum_{j=1}^{|s|} r_{s_j r}} \right) \quad (15)$$

$$I_{withOS} = \log_2 \left( 1 + r_{sd} + \frac{r_{sr} r_{rd}^2}{|s_e| + r_{rd}^2 + \sum_{s_j \in s_e} r_{s_j r}} \right) \quad (16)$$

$r_{rd}^2$  与  $r_{rd}^1$  分别表示有或者无机会调度下目的节点 d 的 SNR。通过式 (12) — (16) 和式 (10) 换算出系统的可达速率：

$$R_{withoutOS} = \frac{W}{|s|+3} \times \log_2 \left( 1 + r_{sd} + \frac{r_{sr} r_{rd}^1}{|s| + r_{rd}^1 + \sum_{j=1}^{|s|} r_{s_j r}} \right) \quad (17)$$

$$R_{withOS} = \frac{W}{|s|+x} \times \log_2 \left( 1 + r_{sd} + \frac{r_{sr} r_{rd}^2}{|s| + r_{rd}^2 + \sum_{s_j \in s_e} r_{s_j r}} \right) \quad (18)$$

(0 < s\_e ≤ s, x = 3/2, 2, 5/2 or 3)

考察在相同码率的条件下，有、无机会调度机制对系统可达速率的影响，假设  $x=3$ ， $r_{rd}^2 = r_{rd}^1$ 。因为  $|s| \geq |s_e|$ ，有  $\sum_{j=1}^{|s|} r_{s_j r} \geq \sum_{s_j \in s_e} r_{s_j r}$ 。因此

$$R_{withoutOS}^{P_{ap}} \leq R_{withOS}^{P_{ap}} \quad (19)$$

即采用机会调度的可达速率高于不采用机会调度时的可达速率。当可以自适应调整网络编码的码率时，自适应打孔可达速率为：

$$P_{ap} = \arg \max_p R^p \quad (20)$$

且：

$$R_{withoutOS}^{P_{ap}} \leq R_{withOS}^{P_{ap}} \leq R_{withOS}^{op} \quad (21)$$

由此可见，机会调度模式能够有效提升网络的可达速率并提高网络容量。通过在机会调度嵌套码架构下提高打孔码率，能够进一步提升网络的可达速率和网络容量<sup>[6]</sup>。

### 3 仿真分析

假设所有的节点有相同的发射功率且所有链路均为瑞利独立慢衰落信道。基于文献[10]的结果，文章采用的编码矩阵为如式 (22)。选取任意目的节点并假定节点获取全部边信息、部分边信息和无边信息。假设  $i_k$  为节点 C 想要获取的目标信息，那么节点 C 获取全部边信息就表示节点 C 侦听到了相邻节点 (B, D) 的信息 ( $i_B, i_D$ )；节点 C 获取部分边信息则表示节点 C 侦听到 (B, D) 其中之

一的信息，无边信息则表示节点 C 仅有自己发射的信息  $i_c$ 。

$$\begin{bmatrix} G_A \\ G_B \\ G_C \\ G_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 5 & 6 & 7 & 4 \\ 7 & 0 & 7 & 3 & 6 & 2 \\ 4 & 5 & 2 & 6 & 5 & 0 \\ 6 & 1 & 5 & 7 & 2 & 5 \end{bmatrix} \quad (22)$$

下面分两种情况分别分析文章中机会调度嵌套码的性能。在第 1 种情况下，假设中继节点已经获取所有收发节点的先验信息，并利用先验信息进行解码。在第 2 种情况下，中继节点仅具有收发节点的先验信息。在传输的过程中，中继节点采用维特比解码算法进行解码<sup>[11]</sup>。在这两种情况下，机会调度与非机会调度嵌套码的误比特率分别如图 3 和图 4 中所示。

由图 3 可见，当中继节点已知要发送至目的节点的所有信息时，目的节点获取到全部边信息时误码率 (BER) 性能最优，没有获取任何边信息时 BER 性能最差。以上情况由节点获取先验信息的多少以及不同编码矩阵的性能差异所致，如果目的节点获取其他节点的先验信息较少，则目的节点的译码性能较差。

由图 4 可见，当中继节点仅已知要发送至目的节点的部分信息时，目的节点无边信息时的性能反而略优于目的节点获取全部边信息时的性能。这可以从差错传播的角度来解释，虽然更多的边信息意味着译码端可以利用译码信息更多，但是由于在中继节点不知道目的节点的全部先验信息时，过多的边信息也可能引入过多的差错。不完整的先验信息引入的差错会对最终的译码性能造成一定的影响。从仿真结果上可以看到边信息数量越多反而性能越差。

基于以上分析，有、无机会调度下嵌套码的瞬时最大容量分别为：

$$C_{inst}^{withOS} = (N_d - k + 1) \log_2(1 + r_k) \quad (23)$$

$$C_{inst}^{withoutOS} = (N_d) \log_2(1 + r_{\min}) \quad (24)$$

此时， $r_{\min}$  表示接收瞬时 SNR 中的最小值。

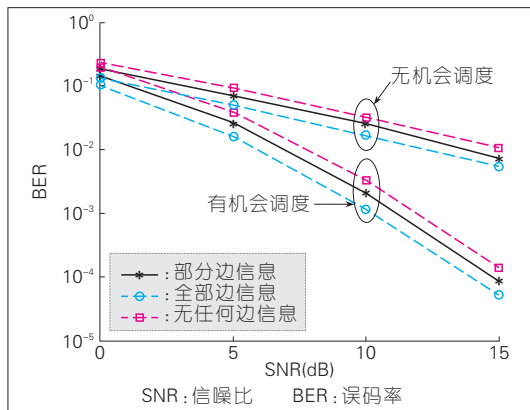


有、无机会调度下网络编码的平均最大容量的表达式:

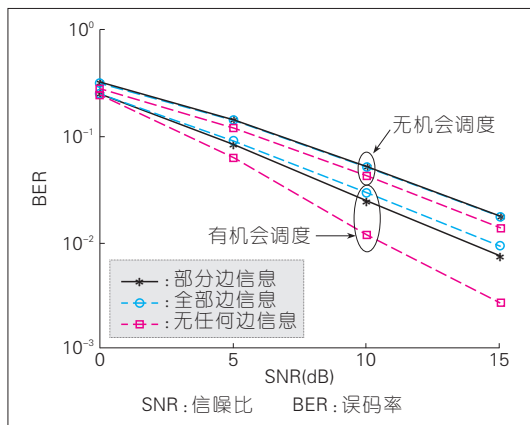
$$C_{Ave}^{withOS} = (N_d - k + 1) \int_0^{\infty} \log_2(1 + r_k) p(r_k) d_{r_k} \quad (25)$$

$$C_{Ave}^{withoutOS} = (N_d) \int_0^{\infty} \log_2(1 + r_{min}) p(r_{min}) d_{r_{min}} \quad (26)$$

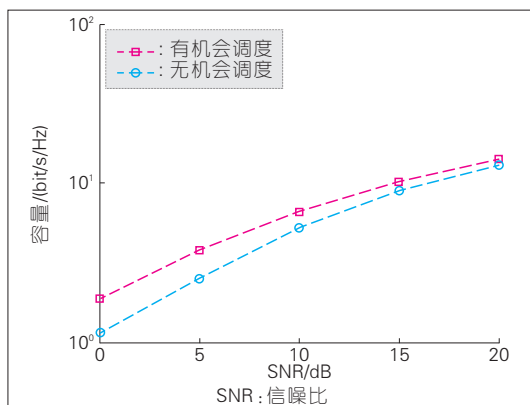
其中,  $p(\cdot)$  为概率密度函数。



▲图3 中继节点获取全部收发节点先验信息的机会调度网络编码误比特率



▲图4 中继节点获取部分收发节点先验信息的机会调度网络编码误比特率



▲图5 机会调度对嵌套码容量的影响

在有、无机会调度的情况下,嵌套码的容量分别如图5所示。由图5可见,机会调度机制对应的最大容量优于非机会调度机制,尤其在低信噪比区域。因为机会调度机制以系统容量最大为优化目标,会选择向链路质量较好的用户传输网络编码包。随着链路SNR的逐渐提高,两种传输机制的容量曲线相接近,由于链路SNR的提高使得所有链路均可传输网络编码包,两种机制的传输策略基本相同。因此性能差异也逐渐缩小。

## 4 结束语

文章将机会调度引入嵌套码,通过提升高信噪比无线链路的传输负荷,充分利用网络中的无线链路,提升多播单中继无线网络的网络容量。仿真结果表明,机会调度方法能够有效提升嵌套码的容量和误码性能。在中继节点获取全部收发节点先验信息时,并且在BER为 $10^{-2}$ 时采用机会调度机制能够获得6 dB的增益,在中继节点获取部分收发节点先验信息时能够获得近4.5 dB的性能增益。当SNR为0~20 dB时,采用机会调度相比非机会调度机制的网络容量最大能有66%的提升。

综上所述,机会调度机制与嵌套码相结合的传输方案相比非机会调度机制,无论从BER性能还是网络容量方面都存在显著提升。

## 参考文献

- [1] PENG M., YANG C, ZHAO Z, and WANG W. Cooperative Network Coding in Relay-Based IMT-Advanced System [J]. IEEE Communication Magazine, 2012, 50(4): 76-84. doi: 10.1109/MCOM.2012.6178837
- [2] LIN H, LIN Y, and KANG H. Adaptive Network Coding for Broadband Wireless Access

Network [J]. IEEE Trans. Parallel and Distributed System, 2013, 244(1): 4-18. doi: 10.1109/TPDS.2012.101

- [3] AMERIMEHR M H and ASHTIANI F. Delay and Throughput Analysis of a Two-Way Opportunistic Network Coding-Based Relay Network [J]. IEEE Trans. Wireless Communication, 2014, 13(5): 2863-2873. doi: 10.1109/TWC.2014.040914.121461
- [4] XIAO L, FUJA T, KLIEWER J, and COSTELLO D. Nested Codes with Multiple Interpretations[C]//40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, Waikoloa, HI, USA, 2006: 851-856
- [5] YOMO H and POPOVSKI P. Opportunistic Scheduling for Wireless Network Coding[C]// Proceeding of IEEE International Conference on Communications '07, Jun. 2007: 5610-5615
- [6] FREMGER P, ORTEN P., OTTOSSON T, and SVENSSON A. Multi-rate Convolutional Codes[M]. United Kingdom: Chalmers University of Technology Press, 1998
- [7] LIN Z and VUCETIC B. Power and Rate Adaptation for Wireless Network Coding with Opportunistic Scheduling [C]// The IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, 2008.
- [8] SHARMA S, SHI Y, LIU J, and HOU Y T. Is Network Coding Always Good for Cooperative Communications [C]// Proc. IEEE INFOCOM, San Diego, USA, 2010
- [9] SHARMA S, SHI Y, HOU Y T, SHERALI H. D, and KOMPELLA S. Optimizing Network-coded Cooperative Communications via Joint Session Grouping and Relay Node Selection[C]// Proc. IEEE INFOCOM, Shanghai, China, 2011
- [10] CHANG J, WANG D. and LIN M. Some Extended Results on the Search for Good Convolutional Codes [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 1997, 43(5):1672-1697. doi: 10.1109/18.623175
- [11] FORNEY G D. The Viterbi Algorithm [J]. Proceedings of the IEEE, 1973, 61(3):268-278

## 作者简介



胡留军,中兴通讯股份有限公司高级工程师、无线预研部部长;主要研究方向为移动通信网络及其关键技术;广东省专利金奖获得者,多项国家及省市重大项目的负责人;已发表论文、专利80余篇。



许进,中兴通讯股份有限公司高级工程师;主要研究方向为新型调制编码、网络编码等无线新技术;在国内外学术刊物及会议上发表论文10余篇。