

# 未来无线网络下的空中 计算技术

## Over-the-Air Computation for Future Networks

**摘要:** 空中计算提供了一种通信和计算一体化的架构,在不需恢复出每个节点个体数据的前提下,通过所有节点的并发传输,利用无线信道的叠加特性,实现目标函数在空口信道中的直接运算。空中计算可以在通信容量受限的计算场景下,减少由于先传输再计算而造成的巨大传输时延。介绍无线网络中空中计算技术的基本原理,同时针对实现计算过程的关键技术展开讨论。

**关键词:** 计算;多址接入;无线信道;未来网络

**Abstract:** Over-the-air computation provides a novel communication and computation integrated architecture. Without recovering individual node's data, it utilizes the summation property of wireless channel to compute the target function directly with all nodes' concurrent transmission. Thus, over-the-air computation can reduce the transmission delay in communication-constrained computation scenario. This paper introduces the principle of over-the-air computation, and discusses the key technologies of its implementation.

**Key words:** computation; multiple access; wireless channel; future networks

### 1 空中计算的研究背景

支持海量节点的接入,是以5G为代表的未来无线网络的主要愿景之一,而接入节点的数量将继续呈现爆炸式的增长。以物联网(IoT)为例,其各种应用场景的实现都将依赖于海量的传感节点部署。在5G移动通信网络中,IoT节点的接入数目将达到亿级,其部署密度将达到每平方千米百万个<sup>[1-3]</sup>。根

据2016年思科的预测,在2021年,全球每月的移动数据流量预计将增至49 EB,比2016年增长7倍,复合年增长率为47%。海量节点的接入需求无疑对传统无线通信中的多址接入方法提出了巨大挑战。

与此同时,未来无线网络将由数据为中心向计算为中心转变。以人工智能为代表的信息处理技术的高速发展,将提供无所不在的计算及智能服务。通



陈力/CHEN Li  
卫国/WEI Guo

(中国科学技术大学,安徽 合肥 230027)  
(University of Science and Technology of  
China, Hefei 230027, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.201901005

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20190129.1606.008.html>

收稿日期:2018-12-02

网络出版日期:2019-01-29

过这些计算和服务,可以实现对海量数据的分析及处理,例如图片识别与分类、智能机器人等泛在的人工智能服务。这意味着我们将来可能更加关注基于数据的计算结果而不是个体数据本身。而传统的“先通信再计算”的分离架构需要先恢复出海量的个体数据再进行计算,无疑会使无线信道面临巨大压力。

为了应对由于海量节点接入而导致的通信受限下的计算问题,以“通信计算一体化”为主要特征的空中计算技术,可能提供了一种解决之道。

## 2 空中计算技术的基本原理

我们首先介绍无线网络中空中计算的基本概念。考虑一个由  $K$  个节点和 1 个接入点组成的无线网络,其中节点  $k \in \{1, \dots, K\}$  的消息为  $s_k$ ,接入点的目标函数为  $f(s_1, \dots, s_K)$ 。

如图 1a) 所示,传统的通信和计算分离的架构,先通过多址接入的无线通信,在接入点端恢复出每个节点的消息  $\{s_k, \forall k\}$ ,再进行目标函数的计算。为了避免节点间干扰,每个节点都需要分配正交的无线资源。以时分多址(TDMA)系统为例,为了完成一个完整的计算,所有参与计算的节点数据必须排队等待分配的传输时隙。只有当最后 1 个节点数据到达计算中心之后,完整的计算才能完成。当节点数目增多且无线资源有限时,计算等待时延将会大大地增加,

从而造成通信受限的计算问题。例如,分别利用传统分离架构和空中计算架构来计算多节点数据平均值,其中接收节点的目标函数为  $\sum_{k=1}^K s_k / K$ 。采用通信和计算分离的架构,需要在接收节点先逐一恢复出所有的发送数据  $\{s_1, \dots, s_K\}$ ,然后再计算平均值;因此需要  $K$  次信道使用。

采用空中计算的架构,假设无线信道满足完美的信号叠加(忽略衰落和噪声),所有发送节点并发传输,接收节点直接空中计算出数据的求和结果  $\sum_{k=1}^K s_k$ ,再通过处理后得到平均值;因此仅需要 1 次信道使用就可以得到计算结果。

考虑一类具有求和结构的目标函数,即满足如下形式:

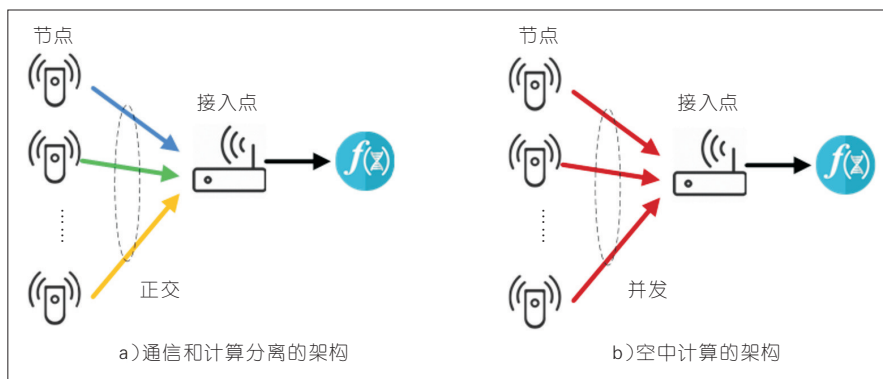
$$f(s_1, \dots, s_K) = \psi \left[ \sum_{k=1}^K \varphi_k(s_k) \right], \quad (1)$$

其中,  $\varphi_k(s_k)$  是每个节点的预处理函数,  $\psi(\cdot)$  是接入点的后处理函数。由于目标函数的求和结构,可以采用空中计算的架构实

现目标函数的计算,如图 1 b) 所示。为说明问题起见,这里假设多址接入信道的信道增益都相同,且不考虑噪声的影响。每个节点对数据进行预处理后得到  $\varphi_k(s_k)$ ,通过所有节点的并发,利用无线信道的叠加特性,接入点得到  $\sum_{k=1}^K \varphi_k(s_k)$ ,再通过处理后恢复出目标函数  $f(s_1, \dots, s_K)$ 。可以看出,空中计算可以避免个体数据的收集而直接完成函数的计算,无论多少个节点,1 次信道使用就可以恢复出目标函数,从而大大降低计算延时。

公式(1)代表的是一类具有求和结构可以空中计算的目标函数,当给定不同的  $\varphi_k(\cdot)$  和  $\psi(\cdot)$  可以得到一系列常用的目标函数,如表 1 所示。当目标函数不满足公式(1)的形式时,需要利用函数近似理论,将目标方程近似拆解成满足公式(1)的函数。本文仅讨论具备公式(1)形式的目标函数。

值得注意的是,除了计算上述具有加性结构的目标函数,空中计算还可以用于计算最大最

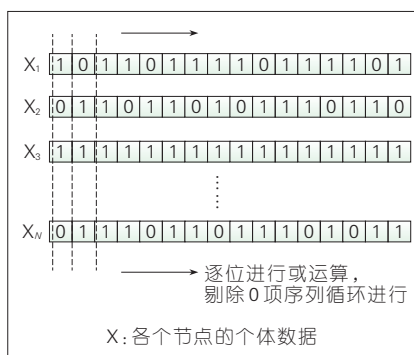


▲ 图1 通信和计算分离的架构对比空中计算的架构

▼表1 不同  $\varphi_k(\cdot)$  和  $\psi(\cdot)$  下的目标函数

目标函数	$\varphi_k(\cdot)$	$\psi(\cdot)$	$f(\cdot)$
算术平均	$\varphi_k(s_k) = s_k$	$\psi(\cdot) = 1/K$	$f = \sum_{k=1}^K s_k / K$
几何平均	$\varphi_k(s_k) = \ln(s_k)$	$\psi(\cdot) = \exp(\cdot)$	$f = (\prod_{k=1}^K s_k)^{\frac{1}{K}}$
多项式	$\varphi_k(s_k) = \omega_k s_k^{\beta_k}$	$\psi(\cdot) = 1$	$f = \sum_{k=1}^K \omega_k s_k^{\beta_k}$
欧式范数	$\varphi_k(s_k) = s_k^2$	$\psi(\cdot) = (\cdot)^{\frac{1}{2}}$	$f = \sqrt{\sum_{k=1}^K s_k^2}$

小值，即  $f = \max_k(s_k)$  和  $f = \min_k(s_k)$ 。以计算最大值为例，如图2所示，通过将  $s_k$  进行二进制量化成  $x_k$ ，利用无线信道的或(OR)特性，依次从最高位向最低位确认每一位为0还是1。从最高位开始，最高位为1的节点发送一个脉冲信号，接收节点如果接收到脉冲信号，则可以判定最高位为1，否则最高位为0。如果最高位为1，则剔除最高位为0的点，再一次进行第2位是0还是1的判决。一直从最高位进行到最低位，从而确定每一位的0,1值的情况，从而得到最大值。同理，通过对  $x_k$  进行反码映射，则可以求得最小值。通过空中计算可以确定1组节点的最大最小值，而不需要收集每个节点的个体数据；因此相应的信道使用次数只和量化



▲图2 利用空中计算来计算一组节点是最大、最小值

序列的长度有关，而与节点数目无关，对于海量节点计算时，可以大大提高通信和计算效率。

空中计算分为模拟和数字2种实现方式，其基本原理如图3所示。图3 a)是模拟域中信号叠加的原理图。通过利用  $M$  个节点间的干扰，接收端可以直接获取到所需的求和函数。模拟空中计算中每个节点不对收集

的数据进行任何形式的编码，而仅对原始数据进行预处理后发射至空中，最终由汇聚中心收集并且进行后处理。由于在真实环境中存在噪声等干扰，为了能够方便地评价模拟空中计算的性能，一般使用失真度作为指标，其定义为：

$$d(\hat{f}(s), f(s)) = |\hat{f}(s) - f(s)|^2, \quad (2)$$

其中  $\hat{f}(s)$  代表估计所得的目标方程， $f(s)$  则代表了理想的目标方程。

虽然模拟空中计算实现相对简单，但是无法有效地对抗噪声，特别是在发射功率较低的时候，汇聚中心接收到的数据存在

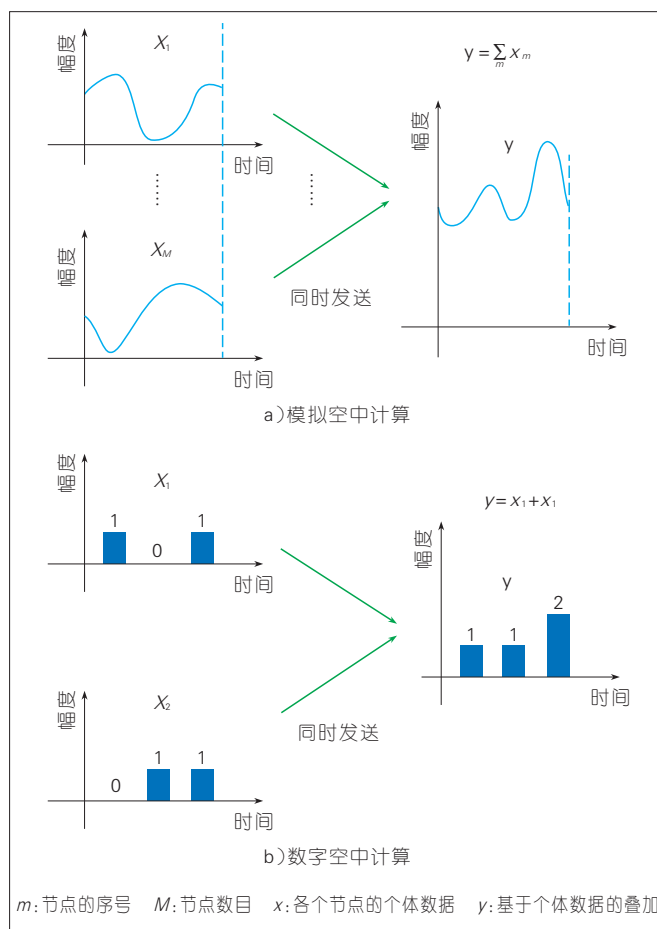


图3 模拟和数字空中计算的基本原理

$m$ : 节点的序号  $M$ : 节点数目  $x$ : 各个节点的个体数据  $y$ : 基于个体数据的叠加

很大干扰;因此,为了改善空中计算的抗噪能力,一类基于信源信道联合编码的数字空中计算被提出。图3 b)是数字域中一个简单的例子。多节点并发使得2个脉冲幅度调制(PAM)信号相互叠加,接收端所获取的新的PAM信号正是待计算的求和函数。节点对采集的数据进行相应的量化编码,再通过空中信道叠加发射,由汇聚节点收集并进行解码。在一个存在噪声和干扰的实际系统中,一般使用可达计算速率来评价数字空中计算的性能,其定义为:

$$R = \frac{k}{n} \quad (\text{每信道使用可以计算的函数数目}), \quad (3)$$

即在  $n$  次信道使用中传输  $k$  次目标方程,且当  $n$  足够大并能够进行无差错传输时,每次信道使用传输的方程数量为可达的计算速率。

### 3 空中计算的相关研究工作

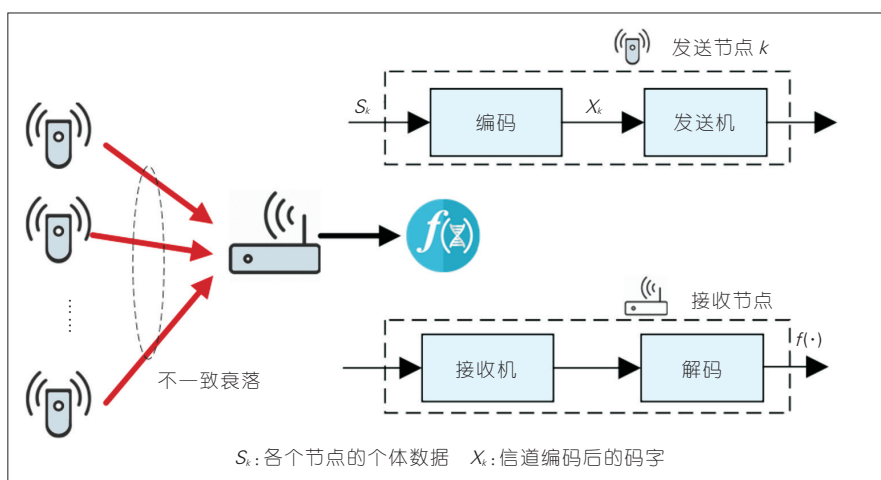
在现有的工作中,文献[4]中的工作使用无线信道的叠加特性实现了一部分简单的模拟函数的计算;文献[5]中的工作则是将模拟空中计算拓展到多簇中进行分析;文献[6]中给出了一种能应用在数字空中计算中且达到标准随机编码性能的数字编码方式;文献[7]中则基于这种编码方式给出了一个简单的数字空中计算架构;文献[8]中进一步提出了一种机会通信的方法来改善数字空中计算中可达计算

速率容易趋近于0的问题。其中,文献[4-7]关于空中计算的研究都非常理想,甚至忽略了无线信道本身具有的衰落特性。虽然文献[7-8]考虑了无线信道的衰落特性,但是所有的分析仅仅是基于窄带通信模型进行的,没有考虑宽带系统的频率选择性信道。除此之外,上述的所有研究都没有对无线网络中的同步或失配进行性能分析或者提出解决方案。

无线通信系统不可避免地受到噪声和干扰的影响,并且无线多址信道的衰落具有随机性和不一致性。这些因素都无法满足空中计算对于信号完美叠加的要求,从而造成相应的计算误差。与传统无线通信系统不同的是,空中计算通信系统中的目标信号不再是个体数据,而是个体数据的叠加,同时等效噪声也不再是节点间干扰和接收噪声,而是非完美叠加造成的计算误差;因此,传统的通信设计方法无法直接用于空中计算通信

系统。现有的空中计算研究对于通信系统的假设往往非常理想,缺乏实际通信参数对计算性能所造成的影响分析,以及针对性的通信设计。

为了对抗多节点无线信道不一致性的衰落,我们提出了一种迫一致性的收发机设计<sup>[9]</sup>,如图4所示,其核心思想在于通过收发机的预失真和后均衡,使得每个节点到接入点的等效信道的衰落都一致,从而满足求和的要求。进一步地,我们还研究了收发节点都具备多天线时相应的收发机设计<sup>[10]</sup>。利用多天线的复用增益,多天线迫一致性收发机不仅仅可以补偿不一致性衰落的信道,同时可以实现多个函数的空中计算。考虑到空中计算依赖于分布式节点的严格同步,我们提出了基于参考信号频谱重构的方法<sup>[11]</sup>,来测量各个节点之间的同步相位的误差。进一步地,基于测量的相位误差值,我们设计了相应的误差均衡器来降低由于同步相位误差而



▲图4 对抗不一致衰落的迫一致性收发机

带来的计算误差。

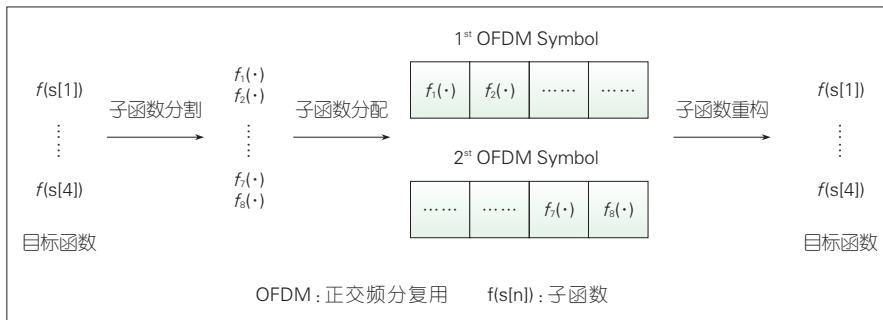
## 4 空中计算工作展望

### 4.1 宽带通信系统中的空中计算

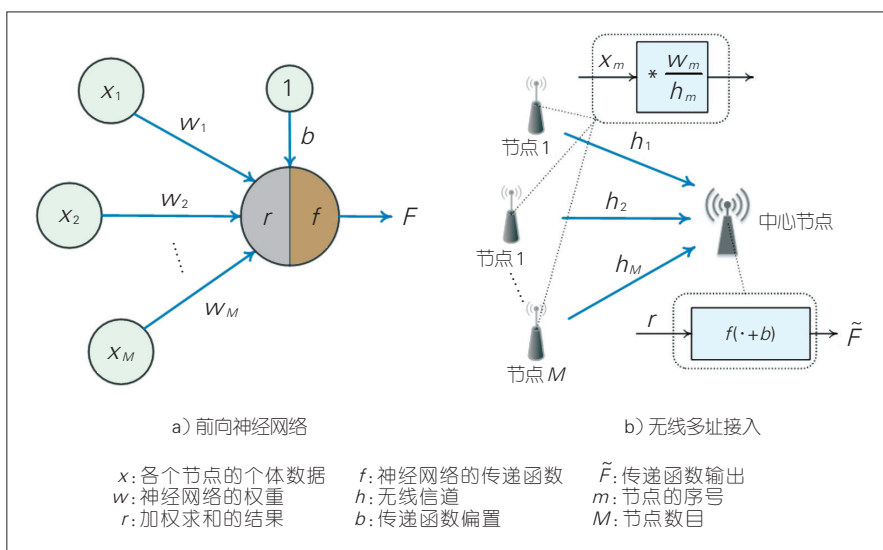
不同于窄带通信系统,宽带通信系统将经历频率选择性信道。即便通过迫一致性收发机设计,也很难完美地补偿无线信道的衰落使其满足计算要求。正交频分复用(OFDM)技术可以将宽带信道划分为多个窄带信道,从而较好地解决了频率选择性衰落的问题。在传统的无线通信系统中,比特级的粒度很小,很容易动态地分配到OFDM系统中的各个资源块。对于空中计算而言,目标方程只有1个,无法匹配OFDM系统中的资源块粒度;因此需要对目标方程进行分割,分配再重构,如图5所示。更小粒度的子方程可以满足资源粒度的匹配,满足空中计算的要求,所以最优的分割、分配和重构设计,是未来研究工作中的一个方向。

### 4.2 利用计算网络来模拟神经网络

如图6所示,前向神经网络的计算依赖于多个信源的加权和,而利用空中计算技术可以在不还原个体数据的前提下获得加权的计算结果;因此我们可以利用无线多址接入的通信网络来模拟前向神经结构的计算网络,从而实现通信和计算一体化,来提高整体效率。如何将通



▲图5 宽带通信系统的空中计算



▲图6 前向神经网络和无线多址接入结构的比较

信网络和计算网络结合在一起进行统一化设计,给出通信和计算的统一化效用并进行最优的设计也是未来研究工作中的一个方向。

## 5 结束语

空中计算的核心思想在于通信计算一体化,它改变了传统体系中通信和计算分离的架构,提示了一种全新的、可以用于直接实现计算结果传输的无线通信新架构。空中计算的技术特别适用于通信受限的计算应用场景,如基于海量物节点的计算

算领域。值得注意的是,空中计算对于无线信道一致性、节点分布式同步的要求比较苛刻,因此如何实现高精度的可靠空中计算是一个亟待探索和研究的重大问题。

### 参考文献

- [1] AKYILDIZ I F, NIE S, LIN S C, et al. 5G Roadmap: 10 Key Enabling Technologies [J]. Computer Networks, 2016, 106: 17-48. DOI:

- 10.1016/j.comnet.2016.06.010
- [2] DEHOS C, GONZALEZ J L, DOMENICO A DE, et al. Millimeter-Wave Access and Backhauling: the Solution to The Exponential Data Traffic Increase in 5G Mobile Communications Systems? [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(9): 88–95. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894457
- [3] ANEREWIS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [4] NAZER B, GASTPAR M. Computation over Multiple-Access Channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(10): 3498–3516. DOI: 10.1109/TIT.2007.904785
- [5] GOLDENBAUM M, BOCHE H, STANCZAK S. Harnessing Interference for Analog Function Computation in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(20): 4893–4906. DOI: 10.1109/TSP.2013.2272921
- [6] NAZER B, GASTPAR M. Compute-and-Forward: Harnessing Interference Through Structured Codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(10): 6463 – 6486. DOI: 10.1109/TIT.2011.2165816
- [7] JEON S W, WANG C Y, GASTPAR M. Computation over Gaussian Networks with Orthogonal Components [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2014, 60(12): 7841–7861. DOI: 10.1109/TIT.2014.2364572
- [8] JEON S W, JUNG B C. Opportunistic Function Computation for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 4045–4059. DOI: 10.1109/TWC.2016.2533379
- [9] CHEN L, QIN X, WEI G. A Uniform-Forcing Transceiver Design for Over-the-Air Function Computation [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(6): 942–945. DOI: 10.1109/LWVC.2018.2840157
- [10] CHEN L, ZHAO N, CHEN Y, et al. Over-the-Air Computation for IoT Networks: Computing Multiple Functions with Antenna Arrays [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(6): 5296–5306. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2843321
- [11] CHEN L, ZHAO N, CHEN Y, et al. Over-the-Air Computation for Cooperative Wideband Spectrum Sensing and Performance Analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 10603–10614. DOI: 10.1109/TVT.2018.2866539

## 作者简介



陈力, 中国科学技术大学副研究员; 主要从事无线通信理论研究及系统实现工作; 作为项目负责人承担国家重大专项、国家自然科学基金项目等; 发表论文 30 余篇, 拥有 5 项国家发明专利。



卫国, 中国科学技术大学教授, 曾任国家“863”计划通信技术主题专家组成员、中国第三代移动通信系统研究开发项目总体组成员、国家“863”计划 B3G 移动通信重大项目总体组成员、“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项总体专家组成员; 主要从事无线通信技术、移动通信网络、信号处理等方面的研究; 获国家科技进步二等奖 1 项; 发表论文 100 余篇, 拥有 10 余项国家发明专利。