

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.003

引用格式:杨润丰,骆春波,张智聪.适用于无人搜救机组的新型移动中继通信模型[J].电讯技术,2014,54(10):1330-1334. [YANG Run-feng,LUO Chun-bo,ZHANG Zhi-cong. A Novel Mobile Relay Communication Model for Search and Rescue UAVs[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(10):1330-1334.]

适用于无人搜救机组的新型移动中继通信模型*

杨润丰^{1,**}, 骆春波², 张智聪³

(1. 东莞职业技术学院 电子工程系,广东 东莞 523808;2. 西苏格兰大学 计算机工程学院,英国 苏格兰 PA1 2BE;
3. 东莞理工学院 机械工程学院,广东 东莞 523808)

摘 要:为了提高无人机远程搜救系统的通信效率和整体搜救成功率,提出了无人搜救机组的新型移动中继通信模型。该模型引入移动中继和协同通信技术,实现无人机组之间以及无人机组与地面基站之间的通信连接、数据传输和信息同步。理论分析和仿真测试表明,该模型提高了无人机组的数据采集效率,减少了无人机组的数据采集时间,提高了控制平台的机动性和搜索效率。

关键词:无人机远程搜救系统;无线通信;移动中继;协同通信

中图分类号:TN925 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)10-1330-05

A Novel Mobile Relay Communication Model for Search and Rescue UAVs

YANG Run-feng¹, LUO Chun-bo², ZHANG Zhi-cong³

(1. Department of Electronic Engineering, Dongguan Polytechnic, Dongguan 523808, China;
2. School of Computing, University of the West of Scotland, England PA1 2BE, UK;
3. School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: In order to improve the communication efficiency of an unmanned aerial vehicle(UAV) network and the success rate of search and rescue, a novel cooperative communication model is proposed which employs mobile relay and cooperative communication technology for multiple UAVs to synchronize data acquisition within the entire system. Theoretical analysis and experimental simulation results demonstrate that the model can increase the data acquisition efficiency, reduce the data collection time, and improve the mobility and search efficiency of the UAV team.

Key words: UAV search and rescue system; wireless communication; mobile relay; cooperative communication

1 引 言

无人机可以取代人类在一些特殊场所进行现场作业,在远程交互式控制中得到了广泛应用^[1-2]。例如,无人机可以投入野外应急搜救工作中,通过采用雷达探测、视频图像分析等方式寻找失踪人员。为了进一步提高搜救的效率和成功率,相关研究已

经开始探索多部无人机搜救网络的理论性能和实际应用^[3]。因为无人机组所组成的远程交互式控制平台比单个无人机具备更高的机动性、灵活性和生存力,该方案更适合在广阔的野外环境中使用。

为了增强无人机组的自控能力,国内外学者在无人机组分布协调、控制和搜索机制方面进行了大

* 收稿日期:2014-05-09;修回日期:2014-07-29 Received date:2014-05-09;Revised date:2014-07-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71201026);东莞市高等院校、科研机构科技计划项目经费资助(2011108102061)
Foundation Item:The National Natural Science Foundation of China(No. 71201026);The Science and Technological Program for Dongguan's Higher Education, Science and Research, and Health Care Institutions(2011108102061)
** 通讯作者:yangrf@dgpt.edu.cn Corresponding author:yangrf@dgpt.edu.cn

量的研究^[4-6]。然而, 现实物理环境具有大量的不确定因素, 因此给无人机组的控制和通信带来了极大的困维。要保障基站与无人机组进行有效的协同控制并保证把不同无人机中采集到的重要数据及时提供给地面救援人员, 无人机组的通信以及无人机组和基站的通信是此平台的关键部分。

为了在传输信息时降低传输延时, 常用的方法是让基站与无人机组之间保持连续的通信连接, 但此方法的缺点是无人机组活动的空间范围变小, 限制了它们部署的环境和搜索的自由度。有学者提出采用多跳无线链路的方式来实现无人机的连接^[5-6], 然而, 为了保证基站与无人机组之间的通信, 部分无人机需要配置在某些特定的地理位置上完成通信功能, 从而限制了无人机的数据采集和整个系统的效率。

本文针对无人机远程搜救的问题以及现有无人机通信系统模型的缺点, 提出了一种新的方案。该方案形成了一个合作通信网络, 并依据数据传输率调节无人机组编队的通信连接和数据采集, 从而克服了多跳系统的数据率和效率低下的问题; 进一步引入的移动中继可以保障无人机组和地面基站间的数据传输, 因此克服了持续连接系统的覆盖范围低的缺点。因此, 该方案使搜救机组在远离基站的区域探索时获得了更大的自由度, 增加了覆盖率, 提高了搜索速度, 从而有助于缩短寻找失踪人员的时间。该模型可以广泛应用在无人机组协同工作的场合, 例如大范围管道设施监测、海上路上溢油检测、森林火灾监控等, 具有一定的通用性和实用性。

为了方便理论分析, 文中相关的符号说明如下: T 表示矩阵转置, H 表示共轭转置, $\text{tr}\{\cdot\}$ 表示矩阵的迹, $\det\{\cdot\}$ 表示矩阵行列式, $E\{\cdot\}$ 表示矩阵期望值, lb 表示以 2 为底的对数函数。

2 理论分析

无人机组的通信系统必须支持远程控制平台所需的控制和搜索指令, 并能有效传输搜救无人机组获取的数据。为了满足这些通信的要求, 该中继系统一般采用具备高度机动性的平台, 持续在远程位置和基站之间传送数据。在系统建模时, 必须反映中继与搜救无人机组进行数据交换所需的高频宽链路和基地与位于远程的无人机组之间通信可容忍的最大延时问题。此外, 系统模型还应该表现的特征包括: 灵活的接入节点(搜救无人机)数目; 联网调

整机组规模; 在一定带宽内的高数据传输速率; 可靠的连接性; 优化配置并协调通信系统模型让无人机组发挥最大工作性能; 互信息的度量和平均数据速率的评估。本节建立该系统的模型并进行相关的理论分析。

2.1 系统模型

图 1 的系统模型展示了搜救机组在选定的集合点把数据传送到中继无人机以及中继无人机与基站的数据输送。为了方便理论分析, 在集合点所有无人机的通信系统保持连接并采用同等的发射功率和带宽。搜救无人机的数量用 M 表示, 每部搜救无人机的通信系统仅配备单天线, 中继机因其主要实现通信功能, 因此配备多天线系统(假设天线数目为 N , 且 $N \geq M$)。假设信道模型为慢衰落莱斯分布, 中继 r 在第 n 个时刻接收的信号可表达为

$$y_r(n) = \mathbf{H}(n) \mathbf{V}(n) \mathbf{x}(n) + \mathbf{w}(n) \tag{1}$$

式中, $\mathbf{H}(n)$ 是信道矩阵, $\mathbf{V}(n) = \{v_1(n), \dots, v_M(n)\}$ 是多用户的预编码矩阵, $\mathbf{x}(n) = [x_1, \dots, x_M]^T$ 是 M 个无人机的信号矢量(为了简化叙述, 我们采用 $U_m (m = 1, 2, \dots, M)$ 来表示第 m 个无人机), $E\{\mathbf{x}(n) \mathbf{x}(n)^H\} = \text{diag}\{P_1, \dots, P_M\}$ 。 $\mathbf{w}(n)$ 是加性高斯白噪声(AWGN), $E\{\mathbf{w}(n) \mathbf{w}(n)^H\} = N_0^2 \mathbf{I}_M$, $\mathbf{I}_M$ 是 M 维单位矩阵, P_m 和 N_0 是相应的信号能量和噪声方差。

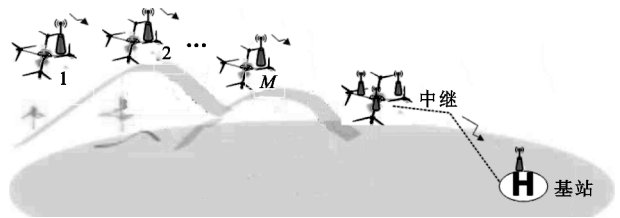


图 1 由无人搜救机组、中继、基站组成的系统模型
Fig. 1 A system model including searching UAVs, a relay UAV and a base-station

公式(1) 等同于一个多输入多输出(MIMO)信道^[7], 因此, 信号接收端的解码方式可采用基于最小均方误差(MMSE)的串行干扰抵消检测算法。其中, 预编码矩阵 $\mathbf{V}(n)$ 是系统模型的重要部分, 代表了无人机组与中继的映射和控制的关系。通过调整该预编码矩阵, 使模型满足协作通信和即时数据交换的要求, 例如协调各个接入设备的传输速率、调整目标的吞吐量等。通过协同通信技术最小化集合的时间, 增加无人机组用于搜索的时间, 中继可以更及时地与基站交换数据, 从而提高整个搜救系统的效率。

2.2 信道模型

因为无人机组和中继之间的通信信道同时具有视距传输和非视距传输的特点,我们采用莱斯分布($H_{i,j} \sim CN(m, \sigma^2)$)对信道进行建模,该信道模型可表达为

$$H = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \bar{H} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \tilde{H} \tag{2}$$

式中, K 是莱斯因子, $\bar{H}$ 代表视线信号分量, $\tilde{H}$ 则为非视线信号分量, 可用具有单位方差的零均值复高斯随机变量建模^[8]。由于 $\bar{H}$ 是确定的, 它的矩阵迹可表达为 $\text{TR}\{\bar{H}\bar{H}^H\} = MN$ 。

2.3 互信息量

公式(1)所示系统模型的互信息为

$$\tau = \text{lb} \det \left\{ I_N + \frac{1}{N_0} HWH^H \right\} \tag{3}$$

其中, I_N 是 $N \times M$ 维单位矩阵,

$$W = V \times \text{diag}\{P_1, \dots, P_M\} \times V^H = \text{diag}\{P_1 v_1^2, \dots, P_M v_M^2\} \tag{4}$$

由于 $\det(I_M + A_{M \times N} B_{N \times M}) = \det(I_N + B_{N \times M} A_{M \times N})$, 公式(3)可变换成

$$\tau = \text{lb} \det \left\{ I_N + \frac{1}{N_0} WH^H H \right\} \tag{5}$$

通过引入 $H^H H$ 矩阵的特征值后, 此互信息量可简化为

$$\tau = \text{lb} \left\{ \prod_{m=1}^M \left(1 + \frac{P_m v_m^2}{N_0} \lambda_m \right) \right\} \tag{6}$$

从公式(6)可以看出, 由于信道 H 受到慢衰落影响, 我们可以通过调整每个并行空间信道支持的数据速率以满足不同接入设备所要求的吞吐量和整个系统的性能。

2.4 平均数据速率

平均数据速率通常用来表达系统传输效率, 是用来验证系统性能的重要指标。因为上述通信系统采用基于最小均方误差(MMSE)的串行干扰抵消检测算法, 故其平均数据速率可表达如下:

$$\mathcal{E} = \iint_{0 \leq \lambda_{m_1} \leq \dots \leq \lambda_{m_M}} \left(\sum_{m=1}^M \text{lb} \left(1 + \frac{P_m v_m^2 \lambda_m}{N_0} \right) \right) \cdot f(\lambda_{m_1}, \dots, \lambda_{m_M}) d\lambda_{m_1} \dots d\lambda_{m_M} \tag{7}$$

其中, 所有顺序特征值 ($0 \leq \lambda_{m_1} \leq \lambda_{m_2} \leq \dots \leq \lambda_{m_M}, m_i \in \{1, 2, \dots, M\}$) 的联合概率密度函数为

$$f(\lambda_{m_1}, \dots, \lambda_{m_M}) = C_1 K^{-M} (K+1)^{-M} +$$

$$MN \prod_{k < l} (\phi_k - \phi_l)^{-1} \cdot$$

$$\prod_{k=1}^M \lambda_k^{N-M} \prod_{k < l} (\lambda_k - \lambda_l)^{-1} e^{-k \sum \phi_l} e^{-\sum_l (K+1) \lambda_l} \cdot \det \{ {}_0F_1(N-M+1, K(K+1) \phi_k \lambda_l) \} \tag{8}$$

式中, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_M$ 是 $\bar{H}\bar{H}^H$ 的 M 个特征值, C_1 是归一化常量, $\bar{M} = M(M-1)/2$ 和 ${}_0F_1(\cdot, \cdot)$ 是带标量参数(由公式(9)得到)的超几何函数:

$${}_0F_1(N-M+1, x) = (N-M)! x^{\frac{N-M}{2}} I_{N-M}(2\sqrt{x}) \tag{9}$$

其中, $I_{N-M}(\cdot)$ 是修正的第一类贝塞尔函数。

经过简单的数学运算, 并使用 $\det^{-1}(\Lambda)$ 取代 $\prod_{k < l} (\lambda_k - \lambda_l)^{-1}$, 平均数据速率可化为

$$\mathcal{E} = \frac{e^{-\sum_{m=1}^M \lambda_m} \det^{-1}(\Lambda)}{\ln(2) (\Gamma(N-M+1))^M} \sum_{m=1}^M \det(\psi(m)) \tag{10}$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数, $\psi(\cdot)$ 是一个 $M \times M$ 的矩阵, 其元素为

$$\{\psi(k)\}_{i,j} = \begin{cases} \int_0^\infty y^{N-i} \ln(1 + \rho y) e^{-y} x_0 {}_0F_1(N-M+1, y \lambda_j) dy, & j = k \\ \Gamma(N-i+1) \times {}_1F_1(N-i+1, N-M+1, \lambda_j), & j \neq k \end{cases} \tag{11}$$

其中, $\rho = P_m v_m^2 / N_0$ 为归一化的发射信号信噪比。

在信噪比较高的区域, 利用詹森不等式可得平均数据速率的近似值为

$$\mathcal{E} \leq \sum_{m=1}^M \text{lb}(1 + \rho E\{\lambda_m\}) \tag{12}$$

上式提供了一个关于平均数据率的上界。另外一个感兴趣的指标是该 M-UAV 通信模型的通信信道容量的边界, 表示如下:

$$\sum_{m \in S} R_m \leq \text{lb} \det \left(I_N + \frac{P_m v_m^2}{N_0} h_S h_S^H \right), S \subset \{1, \dots, M\} \tag{13}$$

从上述结果可推断, 信道矩阵 H 对平均数据速率和信道容量的影响非常重要。一般来说, 当无人机组与中继进行通信时, 无人机在一定范围内须尽量保持较远的距离, 以产生良好的信道矩阵 H , 以支持各个接入无人机所需的最低数据速率。

3 优化算法

在实际应用中, 每部无人机所收集的数据量往往是有差异的, 所以上述模型需要根据实际传输数据所需要的通信时间进行优化。本节介绍该优化算法, 通过最小化无人机组中需要的最长通信时间, 减少每次集合期内无人机组和中继的通信时间, 从而提高中继与基站数据传递的频率, 减少无人机组的等待时间, 增加探测和搜救的时间。具体的算法介绍如下。

假设第 m 个无人机需传输数据 D_m (D_m 表示经信源信道编码组帧后的数据)。根据上述模型, 第 m 个信道所支持的瞬时数据速率可表示为

$$\varepsilon_m = \text{lb}(1 + \frac{P_m v_m^2 \lambda_m}{N_0}) \quad (14)$$

通常该无人机收集的数据所需的传输时间可由公式(15)计算得到:

$$T_m = \frac{D_m}{\varepsilon_m \times B_m} \quad (15)$$

其中, 分配给无人机 U_m 的通信带宽为 B_m 。优化算法通过调整预编码矩阵($\mathbf{v}_m$)达到以下目标:

$$\min \{ \max \{ T_m \}, m = 1, \dots, M \} \quad (16)$$

其中, 调整范围为 $P_{\min} \leq P_m \leq P_{\max}$ 。根据以上公式, 我们提出具体的算法: 无人机组采用最小发射功率发布信息, 通知中继其所要传送的数据量 D_m 。中继通过估算信道矩阵 $\mathbf{H}$, 计算当前的平均数据速率, 然后广播该信号和和数据量组成的矢量 $\mathbf{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_M\}^T$ 给整个无人机组。因为具有最大有效数据的无人机需要的传输时间最长, 它根据上述数据增加发射功率至最大 $P_{\max}$, 其他无人机则通过调整其预编码矩阵来自适应调整自己的最佳发射功率, 使无人机组的数据同步传输到中继。

4 仿真实验

无人机的模拟包括了四轴飞行器动力学、通信系统和面向地面的雷达探测、图像探测等传感器, 仿真程序采用模块化设计并使用 C++ 语言实现, 其中地图模块根据预存的地图随机选择, 每个区域的数据量根据高斯分布随机分配, 这是对现实世界的合理抽象化表达。无人机模块模拟无人机状态, 所有无人机在离地面最低 20 m 的高度飞行, 并使用标准的 A-star 寻路算法进行导航。在搜救阶段, 每个无人机根据其当前的地图和预存的地理信息进行搜索。无人机组的首次集合区域设定在预设搜索区域的中心, 以后每次集合的计划通过本次搜索的结果动态生成。通信模块设定 1 个固定基站、1 部中继无人机和 4 部搜救无人机在模拟的区域进行活动。其中, 无人机组通信系统的噪声为加性高斯白噪声 (AWGN), 信噪比为 20 dB, 信道的莱斯衰减因子 $K = 10$ 。每部无人机的通信带宽为 1 kHz, 发射功率在 $[-10 \text{ dB}, 10 \text{ dB}]$ 内可调, 其可采集到的数据量通过随机高斯分布 $N(1\,000, 500)$ 来模拟。

4.1 系统优化前后无人机传输采集数据的时间对比

4 部搜救无人机在仿真实验中所采集的数据量

分别是 300 b、700 b、800 b 和 1 300 b。在采用优化方案前, 所有无人机的发射功率设为 0 dB, 2 号无人机需要 368 s 完成其数据传输, 远高于其他无人机所花的时间。经过上述的优化算法处理后 2 号无人机的发射功率增至最大值 10 dB; 其他无人机也相应地调整自己的发射功率以节省能量, 整个无人机组把数据同步传输给中继所花时间减少为 184 s。从图 2 可知, 通信系统完成每次采集数据传输所用的时间与最差的无人机通信链接所用的时间成正比, 这与上述的理论分析一致。该实验验证了本文提出的优化算法可以提高数据传输的效率和减少无人机组用于通信的时间。

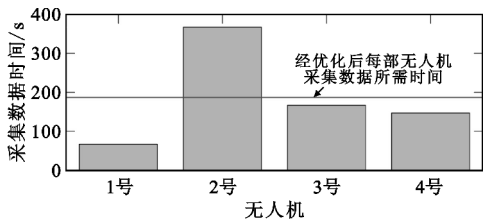


图 2 系统优化前后无人机组传输采集数据的时间对比
Fig. 2 Corresponding time for each UAV collecting data before and after optimization

4.2 系统优化后无人机组和基站数据采集的性能表现

图 3 显示了搜救行动中无人机组和基站的数据更新的过程。无人机组在数据交换前处于搜索状态, 因此数据量呈线性增长趋势。当它们与中继进行数据交换时, 无人机组没有采集新数据, 因此总数据量保持不变。集合行动后, 无人机组继续进行新的数据采集, 中继无人机传输数据到基站并与其完成数据交换, 因此可以看到基站数据量呈离散变化趋势。数据交换的频率取决于基站和集合地点之间的距离。

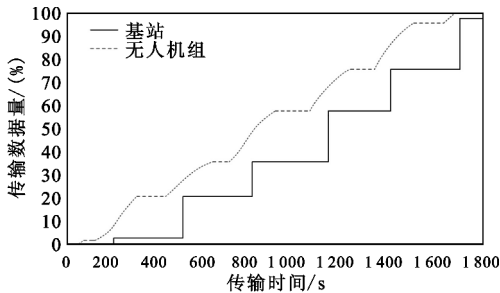


图 3 每次搜救中基站更新数据量和无人机组采集数据量与完成时间的比较
Fig. 3 Completion time comparison between base station information update and UAVs data collection

4.3 无人机组使用中继通信系统与非中继通信系统的性能对比

为了验证无人机组搜救系统使用中继通信模型的有效性,我们进行了以下3组仿真实验:第一组由一部中继无人机与4部搜救无人机组组成搜救系统,采用本文提出的系统模型;第二组由4部搜救无人机组组成搜救系统,各个无人机自己担负与基站的数据传输任务;第三组由5部搜救无人机组组成,其系统实现方式与第二组类似(该组实验用于保证与第一组对比的公平性)。针对后两种系统设定,我们假设基站有足够的保证与所有无人机同时通信。仿真数据是从每个无人机组在不同的地理区域进行10次模拟实验所得。从图4可以看到,在搜索的初期,由于非中继无人机组不需要到集合点进行数据传输,它们的数据采集率较高。然而,随着搜索覆盖范围的增大,中继无人机组数据采集效率增长更快,并超过了全部采用搜救无人机组组成的系统。效率的优势随着时间增长逐渐增大,最后完成的时间远低于另外两组。因此,在野外远程搜救的应用中,无人机组采用中继通信方式将使搜索效率大大提高。

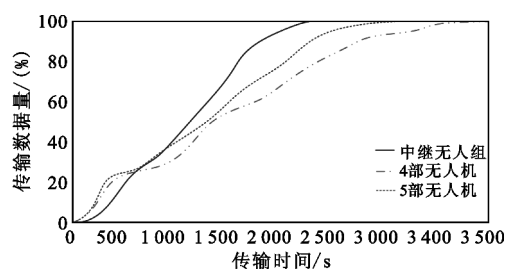


图4 使用中继通信系统与非中继通信系统的无人机组数据采集量对比

Fig.4 Data collection capacity comparison between relay and non-relay UAV communication system

5 结 论

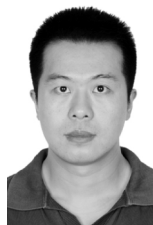
基于搜救无人机组通信的研究,本文提出了移动中继通信方案用于无人机组野外远程搜救。理论分析和仿真实验证实,无人搜救机组采用移动中继通信方式,利用其中一部无人机作为中继,免去了所有无人机与基站保持持续通信连接的需要,在无人机数量不超过中继天线数量($M \leq N$)的条件下可以支持多部无人机对中继的同步通信,然后该中继完成与基站的数据传输,提高了无人机组远程搜救的

灵活性。仿真测试的数据表明,此方法可以提高无人机组整体搜索效率。此外,本方案还可用于协同传感研究中,例如环境监测和灾害响应等,使移动中继通信获得更广泛的应用。

参考文献:

- [1] Yang R, Wang X. Vision Control System for Quadcopter [C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Information Science and Technology. Yangzhou: IEEE, 2013: 261-264.
- [2] 杨润丰. 基于 GSM 双音多频信号控制的小车设计 [J]. 电子科技, 2013(2): 11-12, 16.
YANG Run-feng. GSM based DTMF controlled Vehicle [J]. Electronic Science and Technology, 2013(2): 11-12, 16. (in Chinese)
- [3] Waharte S, Trigoni N. Supporting search and rescue operations with UAVs [C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Emerging Security Technologies. Washington DC, USA: IEEE, 2010: 142-147.
- [4] 吴潜, 雷厉. 多无人机测控与信息传输系统的技术与发展 [J]. 电讯技术, 2008, 48(10): 107-111.
WU Qian, LEI Li. TT&C and information transmission system for multiple unmanned aerial vehicles (UAVs): technology and development [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(10): 107-111. (in Chinese)
- [5] Teacy W, Nie J, McClean S, et al. Maintaining connectivity in UAV swarm sensing [C]//Proceedings of 2010 GLOBECOM. Miami, USA: IEEE, 2010: 1771-1776.
- [6] Hsieh M A, Cowley A, Kumar V, et al. Maintaining network connectivity and performance in robot teams [J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(1): 111-131.
- [7] Proakis J G. Digital communications [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 2001.
- [8] Simon M K, Alouini M S. Digital Communication over Fading Channels [M]. Wiley: IEEE Press, 2004.

作者简介:



杨润丰(1979—),男,广东东莞人,2009年于英国雷丁大学电子工程专业获博士学位,现为讲师、教研室主任,主要研究方向为数字信号处理、无线通信、超宽带。

YANG Run-feng was born in Dongguan, Guangdong Province, in 1979. He received the Ph. D. degree in Electronic Engineering from University of Reading, UK, in 2009. He is now a lecturer and dean of teaching-research section. His research concerns DSP, wireless communication and UWB.

Email: yangrf@dgpt. edu. cn