

一种低复杂度的水声 OFDM 通信系统子载波分配算法

尤 凌¹ 管张均²

1 上海海事大学计算机科学系 上海 201306

2 上海海事大学电子工程系 上海 201306

(yl741183292@163.com)

摘 要 近年来,随着国家“智慧海洋”战略的推进,以及海洋资源开发的需求,基于 OFDM 调制的水声通信技术得到了飞速发展,其关键问题之一就是主节点如何分配子载波资源以优化系统性能。据此,提出了一种低复杂度的水声 OFDM 子载波分配算法,以某个准则挑选出每轮待分配的候选节点,选择综合信道状态最差的节点分配子载波,在提高系统整体传输性能的同时兼顾了最差传感器节点的传输性能。此外,针对多轮分配的连续轮空现象,优先为上轮的“空闲”节点分配其上信道状况最好的子载波。仿真结果表明,改进的算法在几乎不降低原算法性能的前提下较好地解决了连续轮空的问题。算法的提出对水下多传感器组网的资源分配有一定的参考意义。

关键词 水声通信;正交频分复用;子载波分配;信道状态信息;计算复杂度

中图分类号 TN929.3

Low-complexity Subcarrier Allocation Algorithm for Underwater OFDM Acoustic Communication Systems

YOU Ling¹ and GUAN Zhang-jun²

1 Department of Computer Science, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

2 Department of Electronic Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China

Abstract In recent years, underwater acoustic communication technology based on OFDM modulation has been developed rapidly, with the advancement of the national strategy of Smart Ocean, as well as the demand of marine resource development. One of the key issues is the allocation of subcarrier in order to optimize the system performance. In this paper, a subcarrier allocation algorithm with low complexity for underwater OFDM acoustic communication system is proposed, candidate nodes are selected according to a certain criterion in each round, node with the worst comprehensive channel state is the final objective. The algorithm can improve the overall transmission performance of the system, and the transmission performance of the worst sensor node is considered as well. Besides, in case a certain node cannot get any subcarrier resource in multi-round allocations, the idle node in the last round is assigned the subcarrier with the best channel condition in front of other nodes. Simulation results show that the improvement of the algorithm can solve the problem on the premise of hardly reducing the performance of the original algorithm. The proposed algorithm has certain reference significance for the resource allocation of underwater multi-sensor network.

Keywords Underwater acoustic communication, Orthogonal frequency division multiplexing, Subcarrier allocation, Channel state information, Computational complexity

1 引言

我国海域辽阔,所包含的油气资源、渔业资源和矿产资源等储量丰富,带来的经济效益在国民经济建设中发挥着重要的作用。为了保护 and 开发我国的海洋资源,保卫我国领海完整,水下通信技术的发展迫在眉睫。声波在水中的衰减速度与电磁波相比要小很多,可以传输较长的距离,是目前公认的最适宜在水下进行长距离通信的传输形式^[1-3]。然而由于水声信道的可用带宽往往很窄,通常在几十至几百千赫,信号的

能量在水声信道中也会随着通信距离的增加而快速减小。因此,如何充分利用水声信道资源,在有限的信道带宽内优化系统性能,是水声通信领域的一个重要研究方向。正交频分复用(Orthogonal Frequency Domain Multiplexing, OFDM)技术采用多载波调制,将串行高速数据流转换成并行的低速数据流,并在码元中加入循环前缀来减小码间干扰的影响,提高了频带利用率,在水声通信系统中得到了广泛的应用^[4-5]。

在 OFDM 无线通信系统的研究中,资源分配调度算法,尤其是子载波分配算法是一个重要的研究议题^[6]。而在水声

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(61601283)

This work was supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (61601283).

通信作者:管张均(guan_zhangjun@126.com)

OFDM 通信系统中,带宽资源非常有限,更需要通过子载波分配达到最小化发射功率或者最大化传输速率的目的。文献[6]提出了一种基于拉格朗日乘数法的 LTE-A 网络子载波和功率分配算法,用较低的复杂度获得了接近最优算法的性能。文献[7]分析了采用网络编码协作机制的水声 OFDM 通信系统的能效问题,指出子载波的分配和合作用户的数量是最大化能效的关键。文献[8]提出了基于拉格朗日优化和基于容量准则的子载波分配算法,以及非理想反馈下传输速率最大化的子载波分配方案,证明采用马尔可夫预测算法的系统误比特性能和吞吐量性能均优于最小二乘预测算法,可适用于具有大时延的多变水声信道。文献[9]提出了一种启发式的水声 OFDMA 下行传输系统子载波分配算法,以较低的复杂度达到了次最优的传输性能,但是未对分配冲突以及分配结果不唯一的情况给予说明,且未考虑多轮连续分配的情况。文献[10]提出了一种基于中继选择的资源分配算法,将中继选择与子载波分配结合起来进行多用户迭代,有效提升了系统容量。文献[11]针对水下可见光通信系统,提出了一种子载波分配和比特加载联合优化算法,在满足误码率限定的条件下最大化总数据速率,同时维持每个水下传感器节点具有相同的数据速率。文献[12]以最大化 OFDM 系统中的有效子载波数目为目标,根据各子载波上的星座图、误码率门限、传播损失和环境噪声,结合信道信息对各子载波上的功率进行最优分配,获得了优于传统分配算法的性能。

本文在文献[9]的水声 OFDM 子载波分配模型的基础上,首先对文献中算法未说明的分配冲突以及分配结果不唯一的情况作了补充和明确,并提出了另一种分配准则与原分配准则进行对比。此外,文献[9]并未考虑多轮连续分配的情况,此时存在同一传感器节点连续两轮以上轮空(分配不到子载波资源)的现象,这对该节点的信息传输是非常不利的。针对这个问题,本文提出了相应的改进算法,仿真结果表明,在几乎不降低原算法性能的前提下,改进算法较好地解决了这个问题。最后,本文考查了算法的多用户分集性能。

2 水声 OFDM 通信系统模型

本文的水声 OFDM 通信系统模型如图 1 所示,考虑主节点到各传感器节点的下行传输链路。整个信号的传输频带被分成若干个子信道,分别由一条子载波进行调制。通过信道估计,主节点可以获得各条子载波上的信道状态信息。根据信道状态信息和某种分配准则,主节点为每个传感器节点分配子载波资源。当信道状态信息发生变化时,主节点根据更新后的信道状态信息重新进行子载波分配。假设每条子载波只能被一个传感器节点独占,且每个传感器节点最多只能占用一条子载波资源,则当传感器节点数大于子载波数时,每次传输必有传感器节点处于“空闲”状态。假设信道状态值取 1—8 之间均匀分布的随机整数,1 和 8 分别是信道状态的最小和最大值。此时,信道状态信息矩阵为:

$$CSM = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{M1} & C_{M2} & \cdots & C_{MN} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, M 为传感器节点数, N 为子载波数。以 6 个传感器节点和 5 条子载波为例,则信道状态信息矩阵的一次实现可能如表 1 所列。通过这个矩阵,主节点可以分配合适的子载波给各个传感器节点,以优化系统性能。

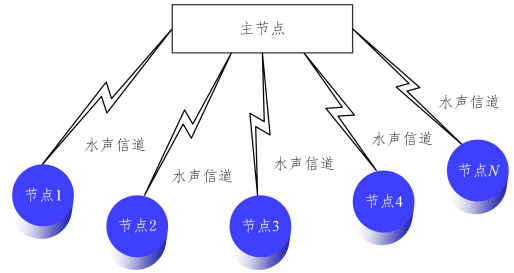


图 1 水声 OFDM 通信系统模型

Fig. 1 Underwater OFDM acoustic communication system model

表 1 信道状态信息矩阵

	Sub-Channel1	Sub-Channel2	Sub-Channel3	Sub-Channel4	Sub-Channel5
Node1	7	3	8	7	6
Node2	8	5	4	8	7
Node3	2	8	7	6	6
Node4	8	8	2	1	4
Node5	6	2	4	7	6
Node6	1	8	8	8	2

3 子载波分配算法

本文选取传感器节点信道状态总和作为主要的评判指标,兼顾最差传感器节点的信道状态值。

很显然,每个传感器节点在一条或几条子载波上可能取得信道状态的最大值,如果直接将其分配给对应的传感器节点,可能会导致后分配的传感器节点只能选择信道状态较差的子载波资源。因此,首先挑选出具有最好信道状态的传感器节点作为候选节点,将候选节点的信道状态值降序排列。若从第二子载波开始,每次淘汰信道状态较好的传感器节点,保留信道状态最差的传感器节点进行下一轮次的比较,则称之为“最差优先”,反之则称为“最好优先”。按照这样的规则,直到找到唯一的待分配节点,为其分配子载波资源。当候选节点全部分配完子载波后还有子载波待分配,则降低标准挑选出新一轮的候选节点,直至子载波资源分配完毕。所提算法可以描述为:

(1) 找到信道状态信息矩阵的最大值作为第一轮分配子载波的标准。

(2) 找到信道状态能取到该最大值的传感器节点作为候选节点,候选节点可能有一个或若干个,只有候选节点才有机会在本轮分配到子载波资源。

(3) 如果候选节点唯一,则直接分配信道状态最大值所对应的子载波给该节点;如果候选节点不唯一,比较各候选节点第二子载波的信道状态值,淘汰信道状态值较高的候选节点,保留信道状态值最低的候选节点进入第三子载波的比较,即“最差优先”算法,直到最后只剩一个候选节点为止,为其分配子载波资源。

若有两个或两个以上的传感器节点其信道状态值从大到

小排列完全一样,则任选一个传感器节点作为最终的目标节点(通常按序号选择),为其分配子载波资源。若目标节点能取到最大值的子载波不止一条,则选择序号最小的子载波进行分配。若目标节点能取到最大值的子载波已被分配出去,则在后续子载波中找到未被分配且信道状态值最大的子载波进行分配。

(4)为第一轮所有的候选节点分配子载波后,将标准值减一挑选出第二轮的候选节点,分配子载波资源,直至子载波资源分配完毕。

为了充分考查算法的性能,我们对算法的第3步做了微小改动,即将“淘汰信道状态值较高的候选节点,保留信道状态值最低的候选节点进入第三子载波的比较”改为“淘汰信道状态值较低的候选节点,保留信道状态值最高的候选节点进入第三子载波的比较”,即为“最好优先”算法,通过仿真观察算法的性能是否有较大改变。

本文仿真了随机分配算法、按子载波轮询算法和按节点轮询算法,将其作为所提算法的对比参照。

当子载波分配算法进行多轮分配时,如果传感器节点数大于子载波数,必有传感器节点于当轮轮空。而下一轮分配时,由于信道状态信息矩阵是随机生成的,所以可能同一个传感器节点依旧轮空,这对该节点传输信息是非常不利的。针对这个问题,对所提算法作了如下改进。

以6个传感器节点和5条子载波为例,记录下第一轮子载波分配后的“空闲”节点。第二轮分配开始时,优先为上轮的“空闲”节点分配其上信道状况最好的子载波,然后在5个传感器节点间分配4条子载波,并记录下当轮的“空闲”节点,这样依次进行。这样做的好处是,不会出现传感器节点连续两轮“空闲”的情况。仿真结果表明,无论是信道状态总和还是最差节点信道状态值,与原算法的差距都非常小,说明改进算法在整体性能改变不大的情况下提升了个别“长期等待”节点的传输性能。

最后本文考查了算法的多用户分集性能,仿真结果表明,算法性能随着传感器节点数的增加而有所提升。

4 仿真结果与分析

在本文的仿真中,子载波数为5,传感器节点数为6,信道状态值取1-8之间均匀分布的随机整数,蒙特卡洛仿真次数为 10^4 。图2给出了各种子载波分配算法下的传感器节点的平均信道状态值。

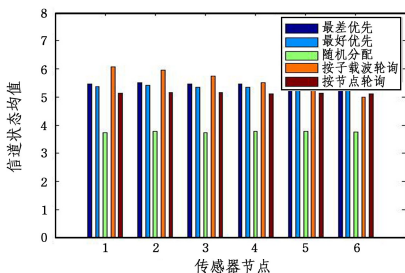


图2 传感器节点平均信道状态值

Fig.2 Average channel state value of sensor nodes

从图2可以看出,除了按子载波轮询算法以外,其他4种

算法分配子载波后,传感器节点间的信道状态值分布较为平均,差距并不明显。同时还可以看出,随机分配下各节点的信道状态值均为最小,其次为按节点轮询算法。

图3和图4分别给出了各种子载波分配算法的传感器节点信道状态总和与最差传感器节点信道状态值。图3和图4的横坐标表示的算法依次为“最差优先”、“最好优先”、随机分配、按子载波轮询和按节点轮询。从图3可以看出,按子载波轮询算法的信道状态总和最大,其次为“最差优先”算法和“最好优先”算法,三者的差距并不大。需要特别注意的是,“最差优先”算法的信道状态总和还略高于“最好优先”算法,这说明给整体信道状况最好的传感器节点设置最高的优先级并不能保证所有节点的信道状态总和最大。相反,“最差优先”算法优先考虑整体信道状况较差的传感器节点,在冲突避让机制下,整体信道状况较好的传感器节点即使分配不到最优的子载波资源,其分配到的子载波上的信道状态值也较大。按节点轮询算法的信道状态总和低于前三者,原因是每个传感器节点的“最优子载波”并不能保证是全局最优。随机分配算法没有进行任何优化处理,因此其信道状态总和最小。从图4可以看出,随机分配算法不但信道状态总和最小,其最差传感器节点信道状态值也为最小。按子载波轮询算法和按节点轮询算法最差传感器节点信道状态值均小于剩余的两种算法,且两两之间均差距不大。原因是无论何种轮询算法,越往后优先级越低,所分配到的资源也就越差。“最差优先”和“最好优先”算法由于设立了冲突避让机制,优先级较低的传感器节点仍有机会选择到相对较好的子载波资源,因此二者最差传感器节点信道状态值比其他3种算法都高。

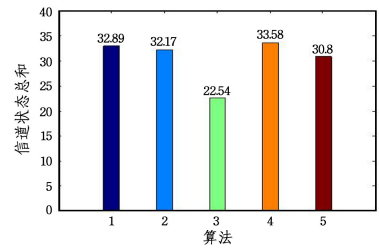


图3 传感器节点信道状态总和

Fig.3 Sum of sensor node channel states

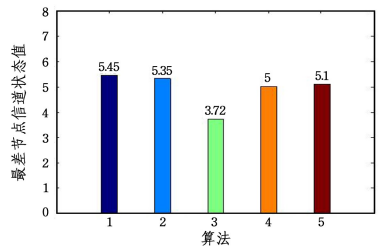


图4 最差传感器节点信道状态值

Fig.4 Channel state value of worst sensor node

图5给出了每一次仿真(每个时隙)未被分配到子载波资源的传感器节点序号,以“最差优先”算法为例。因为有6个传感器节点,只有5条子载波,所以每个时隙必然有一个传感器节点分配不到子载波资源。观察图5可以看到,某些传感器节点会在超过两个的连续时隙上都获取不到子载波资源。

较为极端的一个例子已在图中标出,传感器节点 2 从时隙 77 到 80 的 4 个时隙里都未获得子载波资源,很显然其信息传输受到了极大影响,这也是提出改进算法的主要依据。

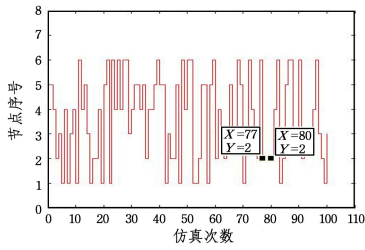


图 5 每个时隙空闲传感器节点序号(“最差优先”算法)

Fig. 5 Index of idle sensor node in every time slot(“worst case first” algorithm)

图 6 和图 7 分别给出了“最差优先”算法和“最好优先”算法与各自改进算法的传感器节点信道状态总和与最差传感器节点信道状态值。其中算法 1、算法 2 为“最差优先”算法与其改进算法,算法 3、算法 4 为“最好优先”算法与其改进算法。从图中可以看出,无论是传感器节点信道状态总和,还是最差传感器节点信道状态值,改进算法与原算法的差距都很小,但却改善了某些时刻某个传感器节点长期处于资源匮乏状态的问题,这极大地提高了这些节点的传输性能。

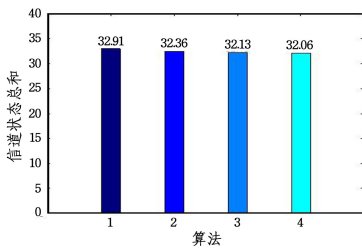


图 6 传感器节点信道状态总和(原算法与改进算法)

Fig. 6 Sum of sensor node channel states (original algorithm and improved algorithm)

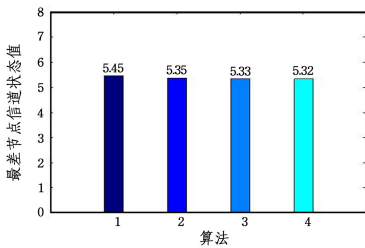


图 7 最差传感器节点信道状态值(原算法与改进算法)

Fig. 7 Channel state value of worst sensor node (original algorithm and improved algorithm)

图 8 给出了各种子载波分配算法下信道状态总和随传感器节点数的变化曲线,其中“最差优先”和“最好优先”算法均非改进算法。从图 8 可知,“最差优先”算法、“最好优先”算法和按子载波轮询算法的信道状态总和都随着传感器节点数的增加而有所提升,这体现了算法的多用户分集性能,即用户数越多,在各个子载波上越有可能找到信道状况更好的用户。其中,按子载波轮询算法增幅最大,但是其对最差传感器节点不够友好,无法兼顾公平性;“最差优先”算法始终略优于“最好优先”算法;而随机分配没有进行任何优化,所以其性能不

随传感器节点数的增加而提升。

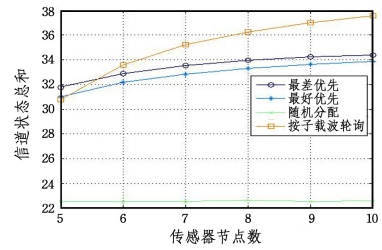


图 8 信道状态总和随传感器节点数的变化曲线

Fig. 8 Curve of sum of channel states with number of sensor nodes

结束语 本文提出了一种基于两个分配准则的低复杂度水声 OFDM 子载波分配算法。针对多轮分配,某个传感器节点可能长期分配不到子载波资源的问题,提出了相应的改进算法。仿真结果表明,在几乎不降低原算法性能的前提下,改进算法较好地解决了这个问题。本文所提算法对水下多传感器组网的资源分配有一定的参考意义。下一步的工作是研究多跳中继传输下的子载波分配问题。

参考文献

- [1] WANG M H, CHEN Y G, UN X, et al. Node Energy Consumption Balanced Multi-Hop Transmission for Underwater Acoustic Sensor Networks Based on Clustering Algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 191231-191241.
- [2] CUI H Y, LIU C X, SI B Y, et al. Iterative receiver for the triple differential PSK modulation in the time-varying underwater acoustic communications [J]. IET Communications, 2020, 14(16): 2813-2819.
- [3] DIVYA K, MAHESWAR R, JAYARAJAN P. Mitigation of Interference in Underwater Wireless Acoustic Communication-A Survey[C] // International Conference on Communication and Signal Processing. Chennai: IEEE Press, 2020: 569-573.
- [4] CHO Y H, KO H L. Channel Estimation Based on Adaptive Denoising for Underwater Acoustic OFDM Systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 157197-157210.
- [5] MA L, JIA H B, LIU S Z, et al. Low-Complexity Doppler Compensation Algorithm for Underwater Acoustic OFDM Systems With Nonuniform Doppler Shifts [J]. IEEE Communications Letters, 2020, 24(9): 2051-2054.
- [6] HE Y Q, LI N, WANG C, et al. Study on Energy Efficient M2M Uplink Subcarrier and Power Allocation in LTE-A Network[J]. Computer Science, 2019, 46(7): 61-66.
- [7] PEREIRA Z C, TON T H, REBELATTO J L, et al. Energy Efficiency of Network-Coded Cooperation in Underwater Acoustic OFDMA Communications with Subcarrier Allocation [C] // OCEANS 2019. Marseille: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [8] YU L. Research on Multiuser OFDM Resource Allocation in Multipath Underwater Acoustic Channel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [9] CHEON J Y, CHO H S. A Heuristic Resource Allocation Method for Underwater Uplink OFDMA System[C] // The Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Sa-

pporo:IEEE Press,2015:811-813.

- [10] ZHOU G L, LI Y M, FU C M, et al. Resource allocation based on relay selection for OFDM underwater acoustic communication system[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2017, 36(2):182-188.
- [11] ELAMASSIE M, KARBALAYGHAREH M, MIRAMIRKHANI F, et al. Resource Allocation for Downlink OFDMA in Underwater Visible Light Communications[C]// *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking*. Sochi:IEEE Press, 2019:1-6.
- [12] JIANG Z, WANG H Y, HAO R Q, et al. Optimum power allocation for underwater acoustic OFDM system [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(6):919-924.



YOU Ling, born in 2000, postgraduate. Her main research interests include wireless communication system and image processing.



GUAN Zhang-jun, born in 1981, Ph.D., lecturer. His main research interests include underwater acoustic communication system and radar signal processing.

(上接第 373 页)

- [28] SOUSA F, CAMPOS R, RICARDO M. Energy-efficient wireless multimedia sensor networks using FM as a control channel [C]// *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. 2014.
- [29] DIAS J, SOUSA F, RIBEIRO F, et al. Green wireless video sensor networks using FM radio system as control channel[C]// *Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*. 2016.
- [30] ABAS K, PORTO C, OBRACZKA K. Wireless smart camera networks for the surveillance of public spaces [J]. *Computer*, 2014, 47(5):37-44.
- [31] PHAM C. Low-cost, low-power and long-range image sensor for visual surveillance[C]// *Workshop on Experiences in the Design and Implementation of Smart Objects*. 2016.
- [32] VÍTEK S, MELNIČUK P. A distributed wireless camera system for the management of parking spaces [J]. *Sensors*, 2018, 18(1):69.
- [33] CHEN H. Research on the Architecture and Power Distribution of Multi-node Cooperative Visual Sensor Network [D]. Qilu University of Technology, 2019.
- [34] BOAVENTURA A, COLLADO A, CARVALHO N B, et al. Optimum behavior: Wireless power transmission system design through behavioral models and efficient synthesis techniques [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2013, 14(2):26-35.
- [35] POPOVI Z, FALKENSTEIN E A, COSTINETT D, et al. Low-power far-field wireless powering for wireless sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101(6):1397-1409.
- [36] VYAS R, LAKAFOSIS V, RIDA A, et al. based RFID-enabled wireless platforms for sensing applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(5):1370-1382.
- [37] XIA Y Q, GAO R Z, LIN M, et al. Research on cloud Control

System of Green Energy Complementary Smart Power Plant [J]. *Journal of Automation*, 2020, 46(9):1844-1868.

- [38] GILBERT J M, BALOUCHI F. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks [J]. *International Journal of automation and computing*, 2008, 5(4):334-347.
- [39] CAMMARANO A, PETRIOLI C, SPENZA D. Pro-Energy: A novel energy prediction model for solar and wind energy-harvesting wireless sensor networks[C]// *International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*. 2012.
- [40] ALIPPI C, GALPERTI C. An adaptive system for optimal solar energy harvesting in wireless sensor network nodes [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2008, 55(6):1742-1750.
- [41] KIM S, VYAS R, BITO J, et al. Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(11):1649-1666.
- [42] ZHOU S, GONG J, WANG X L, et al. Energy Management and Resource Optimization of Wireless Communication under dynamic Energy Acquisition [J]. *Science in China: Information Science*, 2012, 42(10):1217-1230.



HE Quan-qi, born in 1998, postgraduate, is a member of China Computer Federation. His main research interests include embedded software of camera and the image processing.



YU Fei-hong, born in 1964, Ph.D., professor, Ph.D supervisor. His main research interests include optical design and image processing.