

doi:10.13756/j.gtxyj.2018.04.014

无线通信技术

超密集异构网中基于小区休眠的用户关联算法

尼俊红¹, 郭浩然¹, 郭浩晗², 宋计林³

(1. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003; 2. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
3. 国网河北省电力有限公司 邢台供电分公司, 河北 邢台 054000)

摘要:在超密集部署异构蜂窝网中,由于小小区基站数量的增多,移动网络的能效问题变得尤为突出。为了降低超密集异构网中的能量消耗,实现“绿色蜂窝网络”这一目标,文章提出了一种基于小区休眠的用户关联改进算法来优化系统能效,通过执行基于干扰图的小区休眠准则,使一些满足条件的轻载基站也切换为轻载小区休眠模式,从而减少基站间的干扰并进一步降低了系统能耗。同时,文章对所提算法及对比算法的性能进行了仿真,仿真结果表明,所提算法在能耗和能效方面明显优于原算法,达到了优化系统能效的目的。

关键词:超密集部署;用户关联;小区休眠;能效

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2018)04-0056-05

An User Association Algorithm based on Cell Sleeping in Ultra-Dense Heterogeneous Networks

NI Jun-hong¹, GUO Hao-ran¹, GUO Hao-han², SONG Ji-lin³

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, NCEPU, Baoding 071003, China;

2. School of Information Technology and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Xingtai Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Supply Co., Ltd., Xingtai 054000, China)

Abstract: In ultra-densely deployed heterogeneous cellular networks, energy efficiency of the network has become prominent due to the increasing number of small cell base stations. In order to reduce the energy consumption and achieve the goal of "green mobile network", an improved user association algorithm based on cell sleeping is proposed to optimize the energy efficiency in this paper. At the same time, some light-loaded base stations which satisfy the cell sleeping criterion according to the interference graph will also switch to the sleeping mode. Finally, the performances of the proposed and conventional algorithms are compared in the simulation. The results show that compared with the conventional algorithm, the proposed algorithm has much better performance in energy consumption and energy efficiency, achieving the goal of optimizing system energy efficiency.

Key words: ultra-dense deployment; user association; cell sleeping; energy efficiency

0 引言

近年来,移动数据流量经历了爆炸式的增长,思科的视觉网络指数报告预测,未来 10 年全球移动通信业务流量将增长 500~1 000 倍^[1]。从 2014 年起,第 5 代移动通信系统(5th Generation, 5G)已经成为了信息通信领域关注度最高的研究课题之一。5G 中最具有前景的三大关键技术分别为超密集部署、毫米波传输和大规模天线阵列^[2],其中,超密集网络(Ultra-Dense Network, UDN)技术是解决流量爆炸式增长的有效方案之一。UDN 中小小区基站数量的增加势必会带来网络能量的大量消耗,因此“绿色蜂窝网络”的能耗问题已成为热门的研究课题,而小区休眠是基站节能最有效的方法之一^[3]。将小区休眠和用户关联联合起来考虑,在保证系统

吞吐量的基础上降低能耗、提高系统能效是需要进一步解决的问题。

文献[4]、[5]通过优化系统吞吐量来进行用户关联,文献[6]提出了最大化网络效用的用户关联算法。但这些文献在进行用户关联时,仅考虑了系统吞吐量的最大化,未考虑系统整体能效的优化问题及 5G 中“绿色通信”的目标。针对以上不足,本文专注于 UDN 中的能耗问题,在文献[6]的基础上提出了一种考虑系统能效的改进用户关联算法,将优化目标设定为最大化能效,使满足休眠条件的一些轻载基站休眠,在保持吞吐量水平的基础上,进一步降低能耗,提升系统能效。

1 系统模型与问题建模

本文考虑下行超密集异构蜂窝通信系统,系统

收稿日期:2017-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771195, 61601182);河北省自然科学基金资助项目(F2017502059, F2014502029);中央高校科研业务费资助项目(2016MS98)

作者简介:尼俊红(1971—),女,河北保定人。副教授,博士,主要研究方向为无线资源管理与优化、通信网络管理。

通信作者:郭浩然,硕士。E-mail:1310076357@qq.com

模型如图 1 所示,研究范围为宏基站和小小区基站共存的网络,每个宏基站下随机分布小小区基站和用户设备。假设研究范围内共有 N 个用户和 K 个基站。 N 为所有用户的集合, K 为所有基站的集合, M 为宏基站的集合, S 为小小区基站的集合。考虑到超密集部署的定义,基站数量大于用户数量,系统总带宽为 W 。为不失一般性,假设所有基站均工作在同一频带,并且频率复用系数为 1。

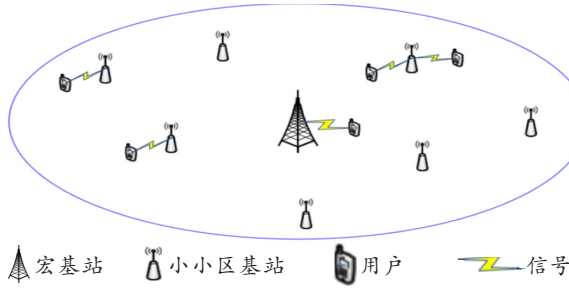


图 1 超密集异构蜂窝网系统模型

用户 n 与基站 k 之间的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)由下式给出:

$$\text{SINR}_{nk} = \frac{p_k g_{nk}}{\sum_{j=1, j \neq k}^K p_j g_{nj} + \sigma^2}, \quad (1)$$

式中: p_k 为基站 k 的发射功率; g_{nk} 为基站 k 与用户 n 之间的信道增益; σ^2 为高斯白噪声功率。根据香农公式,用户 n 从基站 k 获得的单位频谱效率 r_{nk} 为

$$r_{nk} = \lg(1 + \text{SINR}_{nk}). \quad (2)$$

引入一个休眠指示变量 l_k ,当基站 k 处于休眠状态时,其值为 0,否则为 1。基站的总发射功率并不等于实际功耗,基于文献[7]中给出的功耗模型,基站 k 运行时,其功耗 C_k 可表示为

$$C_k = P_k^0 + \Delta_k p_k, \quad (3)$$

基站 k 休眠时,其功耗 C_k^{sleep} 可表示为

$$C_k^{\text{sleep}} = P_k^{\text{sleep}}, \quad (4)$$

式中: P_k^0 为基站 k 运行时的固定功耗; Δ_k 为基站 k 功耗模型的斜率; P_k^{sleep} 为基站 k 休眠时的功耗。因此系统的总功耗 P_{total} 可表示为

$$P_{\text{total}} = \sum_{k \in K} (C_k l_k + C_k^{\text{sleep}} (1 - l_k)). \quad (5)$$

假设带宽资源在与同一基站相关联的所有用户中平均分配^[8],定义系统的能效 ee 为

$$ee = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{W}{\sum_{n=1}^N a_{nk}} r_{nk} a_{nk}}{P_{\text{total}}}, \quad (6)$$

式中, a_{nk} 为用户关联指标,当用户 n 接入基站 k 时,其值为 1,否则为 0。

本文同时考虑系统吞吐量和实际功耗来设计用户关联方案,通过最大化目标函数来找到用户关联矩阵和小区休眠指示矩阵。当基站处于休眠状态时,不再参与用户的接入选择。优化模型可描述为

$$\max_{a, l} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K a_{nk} l_k \lg \left(\frac{W}{\sum_{n=1}^N a_{nk}} \lg(1 + \text{SINR}_{nk}) \right)}{P_{\text{total}}}, \quad (7)$$

其约束条件如下: $\sum_{k=1}^K a_{nk} = 1, \forall n; l_k \in \{0, 1\}, \forall k; a_{nk} \in \{0, 1\}, \forall n, \forall k; l_k = 1 \left(\sum_{n=1}^N a_{nk} > 0 \right)$ 。最后一个约束条件表示,当基站 k 的负载大于 0 时, l_k 的值为 1,即只有当基站 k 空载时,其才能休眠。

不难发现,此优化问题为非线性混合整数优化问题,并且用户关联指标和小区休眠指标是耦合的变量形式,很难通过组合优化直接求解。因此,本文提出了一种改进的启发式算法来寻求问题的次优解。

2 基于小区休眠的节能用户关联算法的实现过程

2.1 效用函数和概率选择矩阵

定义代价收取因子 $ct_k = \mu V_k$,其中 μ 为比例系数, V_k 为除基站 k 关联的用户外,基站 k 对其他所有用户干扰之和。引入代价收取因子是为了避免干扰较大的基站为用户提供服务。

$U(ee_{nk})$ 为基于能效的效用函数,其定义为

$$U(ee_{nk}) = \lg \left(\frac{r_{nk}}{C_k} \right). \quad (8)$$

效用函数的更新规则被定义为

$$U(ee_{nk}) = U(ee_{nk}) - ct_k. \quad (9)$$

定义概率选择矩阵 $\mathbf{Q}_{N \times K} = \{q_{nk}\}$, q_{nk} 由式(10)给出,

表示用户 n 选择基站 k 的概率,且 $\sum_{k=1}^K q_{nk} = 1$ 。

$$q_{nk} = \frac{\exp(\lambda U(ee_{nk}))}{\sum_{k=1}^K \exp(\lambda U(ee_{nk}))}, \quad (10)$$

式中, λ 为一个正参数,根据文献[6],取 $\lambda = 1$ 。

2.2 干扰矩阵的构造

将只关联一个用户的基站定义为轻载基站。如果存在邻近的未休眠基站,该基站对关联到轻载基站用户的干扰达到干扰阈值,则轻载基站休眠后,其负载可以选择邻近的基站进行接入来保证用户的吞

吐量。如果用户周围没有这样的邻近基站,则为其提供服务的轻载基站不能休眠。构造干扰矩阵 $\mathbf{I}_{N \times K}$,元素取值为 $\{0,1\}$ 。如果 $p_i g_{ni} \geq \epsilon p_k g_{nk}, i \neq k$,则 $I_{ni}=1, \epsilon$ 为干扰阈值, p_i 为第 i 个基站的发射功率, g_{ni} 为用户 n 与第 i 个基站之间的信道增益。

2.3 算法实现过程

(1) 用户关联过程的迭代

假定所有基站均处于活跃状态,初始化休眠指示矩阵 $\mathbf{L}=\{l_k\}$ 。用户初始时刻选择每个基站的概率相同,初始化用户关联指标矩阵 $\mathbf{A}=\{a_{nk}\}$ 。在每次迭代的开始,用户 n 选择对其提供最大概率的基站 k 作为候选基站。用户确定候选基站后,观察其从候选基站所得的吞吐量,根据式(3)和式(8)分别计算候选基站的功耗和用户的效用,确定价格收取因子,通过式(9)进行效用函数的更新;将更新后的效用函数代入式(10)更新概率选择向量 q_{nk} ,最后生成概率选择矩阵 $\mathbf{Q}$ 。当一个用户的选择概率向量与1的差距达到计算精度时,迭代终止。否则,迭代继续。用户关联过程完成后,相应的用户关联指标 $a_{nk}=1$,其余 $a_{ni}=0, i \neq k$ 。

(2) 基站休眠

迭代过程完成后,没有用户关联的基站直接进行休眠,休眠指示矩阵中相应的分量 $l_k=0$,用户不再选择它进行接入。对于只关联一个用户 n 的轻载小区 k ,需要根据休眠判断准则做出休眠判断:构造干扰矩阵,判断用户 n 的 $\sum_{i=1, i \neq k}^K I_{ni}$ 是否大于0。如果其大于0,则基站 k 休眠,由基站 k 关联的用户 n 选择到对它有最大干扰的小区作为其服务小区;如果其等于0,则对下一个轻载基站进行休眠判断,当所有基站判断完成后,算法终止。

参考文献[6]的证明过程表明算法最终能得到收敛。

3 仿真结果分析

3.1 系统模型和仿真参数的选取

本文使用 Matlab 软件进行仿真,为使结果更加准确,将仿真次数设置为1 000次。仿真中设3个宏基站,每个宏基站的覆盖半径为500 m,宏基站之间距离为1 000 m。每个宏基站下随机部署40个小小区基站,与宏基站的最小距离为100 m。每个宏基站下,用户到达服从 λ 的泊松分布,且用户位置随机部署。比例系数 μ 取 1×10^8 。仿真所用的路损模型和基站设置参照文献[6],相关参数如表1所示。

示。功耗模型参数如表2所示。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
宏基站路损/dB	15.3+37.6lg d
小小区基站路损/dB	38.5+20lg d
宏基站发射功率/dBm	46
小小区基站发射功率/dBm	20
阴影衰落/dB	8
系统带宽/MHz	10
噪声功率/dBm/Hz	-174

表 2 功耗模型参数

基站类型	固定功耗/W	功耗模型斜率	休眠功耗/W
宏基站	130.0	4.7	75.00
小小区基站	4.8	8.0	1.92

3.2 仿真结果和分析

本文将原算法(对比算法1)、最大信道增益接入算法(对比算法2)和文献[9]算法(对比算法3)作为对比算法。原算法基于吞吐量设计效用函数,在每次迭代过程中,用户均选择提供最大效用函数的基站进行接入,直到算法达到收敛后,迭代终止,用户关联完成后空载基站切换为休眠模式。最大信道增益接入算法是指,用户选择为其提供最大信道增益的基站进行接入,由于用户均关联至性能较好的基站,因此能获得更好的吞吐量性能,但该算法并未考虑基站休眠,所以系统能耗相对较高。文献[9]算法研究了基于干扰矩阵的用户关联算法,其根据用户获得的信漏噪比和基站的负载设计效用函数,用户则选择提供最大效用函数的基站进行接入。

图2~4分别比较了本文算法、对比算法1、对比算法2和对比算法3这4种算法的系统吞吐量、系统总能耗和系统能效随用户数量的变化情况,仿真中本文算法的干扰阈值取0.8。由图2可以看出,4种算法的吞吐量均随着用户数量的增加而增加。本文算法的系统吞吐量和对比算法1、对比算法2相比并没有明显下降,但明显高于对比算法3。从图3中不难发现,相较于未考虑小区休眠的对比算法2和对比算法3,对比算法1和本文算法的总能耗均有明显的降低,由于本文算法考虑了系统能效的优化和轻载基站的休眠,所以本文算法的系统总能耗明显低于其他3种对比算法;随着用户数量的增加,轻载基站的不断减少,本文算法的总能耗与原算法的差距也在不断减小。由图4可以看出,由于本文算法基于能效最优进行接入,因此相对于其他3种对比算法,本文算法的系统能效有大幅度的提高,达到了提升系统能效的目的。

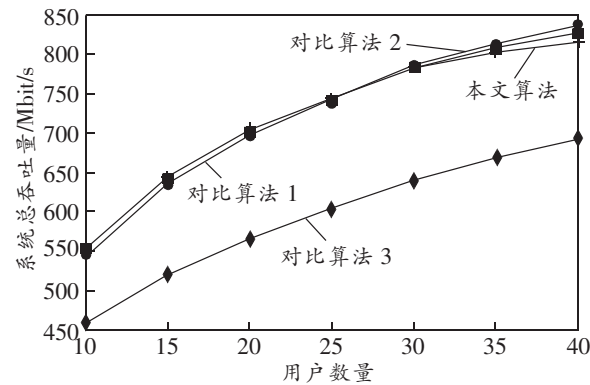


图 2 系统吞吐量随用户数量的变化

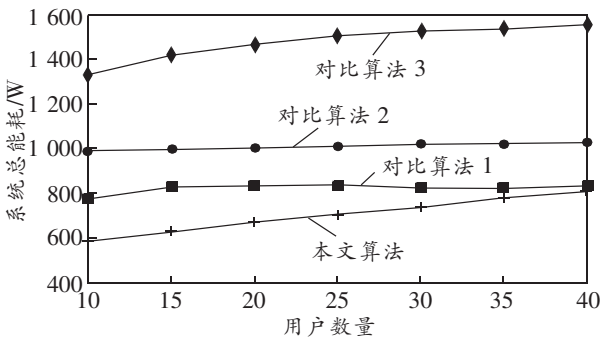


图 3 系统能耗随用户数量的变化

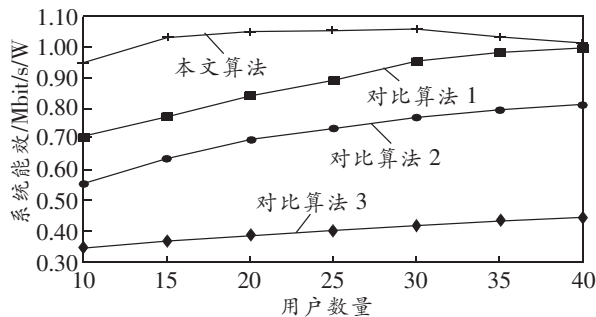


图 4 系统能效随用户数量的变化

图 5 所示为干扰阈值 ϵ 对系统能效的影响, 仿真中每个宏基站下用户数量服从 λ 为 20 的泊松分布。由于对比算法 2 和对比算法 3 未考虑系统能耗, 故图 5 中只与考虑了系统能耗的对比算法 1 (即原算法) 作比较。由于原算法与 ϵ 无关, 所以原算法的系统能效几乎保持不变。从图 5 中可以发现, 本文算法的系统能效在不同干扰阈值下均明显优于原

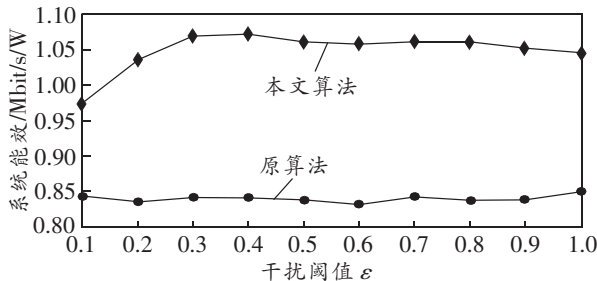


图 5 系统能效随干扰阈值的变化

算法, 实现了能效的优化。

表 3 对 4 种算法的仿真耗时进行了统计。仿真中每个宏基站下用户数量服从 λ 为 20 的泊松分布, 干扰阈值取 0.8。对比算法 2 是最基本的关联算法且没有执行迭代过程, 所以其仿真耗时最小。对比算法 3 虽然涉及了迭代, 但算法容易达到稳定状态, 所以其仿真耗时也低于对比算法 1 和本文算法。本文算法虽然增加了轻载基站休眠算法, 但是原算法在用户关联过程中同时考虑了吞吐量和负载, 所以增加了对基站空载情况的处理时间, 从表 3 中可以看出, 本文算法的仿真耗时低于对比算法 1 (即原算法)。

表 3 算法仿真耗时

算法	仿真耗时/s
本文算法	0.420 735 97
对比算法 1	0.460 671 69
对比算法 2	0.292 803 41
对比算法 3	0.337 828 32

4 结束语

本文针对超密集部署异构蜂窝网的特点, 研究了用户关联过程的能效问题。通过 Matlab 软件仿真分析了所提算法的系统吞吐量、总能耗和能效 3 个性能指标, 并与其他算法进行了对比。仿真结果表明, 所提算法在保证吞吐量无明显下降的基础上, 较原算法大大降低了能耗, 达到了提高系统能效和实现“绿色通信”的目的。

参考文献:

[1] 王莹, 缪中宇, 张平. 超高密度网络关键技术及研究现状 [J]. 北京邮电大学学报, 2015, 38(5):1-17.

[2] Andrews J G, Buzzi S, Wan C, et al. What Will 5G Be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6):1065-1082.

[3] Wu J, Zhang Y, Zukerman M, et al. Energy-Efficient Base-Stations Sleep-Mode Techniques in Green Cellular Networks: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2):803-826.

[4] 李丽. 基于负载预分配的移动负载均衡算法 [J]. 光通信研究, 2016, (3):69-72.

[5] Stridh R, Bengtsson M, Ottersten B. System Evaluation of Optimal Downlink Beamforming with Congestion Control in Wireless Communication [J]. Wireless Communications IEEE Transactions on, 2006, 5(4):743-751.

[6] Qi Y, Wang H. Interference-Aware User Association under Cell Sleeping for Heterogeneous Cloud Cellular

- Networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(2):242—245.
- [7] Wang B, Kong Q, Liu W, et al. On Efficient Utilization of Green Energy in Heterogeneous Cellular Networks [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(2):846—857.
- [8] Ye Q, Rong B, Chen Y, et al. User Association for Load Balancing in Heterogeneous Cellular Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 12(6):2706—2716.
- [9] Zhang T, Peng Z, Zhu Y, et al. Interference Matrix based User Association Scheme in Heterogeneous Cellular Networks [C]//IEEE International Conference on Communication Systems, Macau:IEEE, 2015:354—358.
-
- (上接第34页)
- 参考文献:**
- [1] 陈宏泰, 车相辉, 张宇, 等. 1.3 μm AlGaInAs/InP 量子阱激光器材料研究[J]. 微纳电子技术, 2013, (4): 220—223.
- [2] 马宏, 易新建, 金锦炎, 等. 1.3 μm 无致冷 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器设计与制作[J]. 光子学报, 2002, 31(2):191—195.
- [3] Selmic S R, Chou Tso-Min, Sih Jiehping, et al. Design and Characterization of 1.3- μm AlGaInAs-InP Multiple-Quantum-Well Lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(2):340—349.
- [4] 何斌太, 刘国军, 魏志鹏, 等. 1.3 μm InGaAsSb/GaAsSb 量子阱激光器有源区结构设计[J]. 激光与红外, 2015, (5):505—508.
- [5] 陈远祥, 余建国, 王任凡, 等. 基于自零差检测的高速模式复用无源光网络[J]. 光通信研究, 2017, (5):1—5.
- [6] 徐遵图. 980 nm 大功率 InGaAs/GaAs 和 InGaAs/InGaAsP 应变量子阱激光器的研制[D]. 北京:北京工业大学, 1999.
- [7] 徐华伟. 852 nm 半导体激光器结构设计及外延生长[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [8] 李小波. 基于大失配外延 GaAs 基 InGaAsP 激光器材料生长和器件的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2015.
- [9] 金哲军. InP 基 InGaAlAs/InGaAsSb 应变量子阱激光器材料与设计研究[D]. 长春:长春理工大学, 2008.
- [10] 刘崇, 葛剑虹, 陈军. 外腔反馈半导体激光器的损耗和阈值特性研究[J]. 中国激光, 2004, 31(12):1413—1416.
- [11] Yekta V B, Kaatuzian H, Yekta V B, et al. Simulation and Temperature Characteristics Improvement of 1.3 μm AlGaInAs Multiple Quantum Well Laser[J]. International Journal of Optics & Applications, 2014, 4(2):46—53.
- [12] 韩威. 1.55 μm 高速激光器材料结构设计及外延生长[D]. 天津:河北工业大学, 2006.
- [13] Yan C L, Qin L, Ning Y Q, et al. Calculation of Energy Band Structure of GaInAs/GaAs Quantum Well[J]. Laser Journal, 2004, 25(5):29—31.
- [14] Ke Q, Tan S Y, Liu S T, et al. Fabrication and Optimization of 1.55 μm InGaAsP/In High-Power Semiconductor Diode Laser [J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(9):93—96.
- [15] 华玲玲, 杨阳. 应变量子阱能带偏置的分析与计算[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5):168—175.
- [16] 马宏, 易新建, 金锦炎, 等. MOVPE 生长 1.3 μm 无致冷 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器研究[J]. 中国激光, 2002, 29(3):193—196.
- [17] Sato N, Shirao M, Sato T, et al. Design and Characterization of AlGaInAs/InP Buried Heterostructure Transistor Lasers Emitting at 1.3- μm Wavelength [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4):1502608.