

DOI: 10.7667/PSPC170374

# 基于绿色无线网络覆盖最优的配电通信网规划方法研究

李莉<sup>1</sup>, 朱正甲<sup>1</sup>, 任赞<sup>2</sup>, 贺艳华<sup>2</sup>, 唐良瑞<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100038; 2. 华北电力大学, 新能源国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 在配电系统中, 终端的高覆盖率和网络的低能耗是配电无线通信网的规划中两个互相矛盾的目标。提出一种基于绿色无线网络覆盖最优的配电无线通信网规划方法。将覆盖率和能耗两个规划因素作为规划模型中的正负相关因素目标, 建立多目标优化模型, 并利用提出的配电异构规划算法得出最优解。仿真结果表明, 该方法能够有效地保证终端的高覆盖率, 同时保证了所部署的基站规划方案的网络能耗处于较低的水平。

**关键词:** 配电无线通信网; 异构网络; 基站规划; 绿色网络; 覆盖最优

## Research on distribution communication network planning method based on green wireless network coverage optimizing

LI Li<sup>1</sup>, ZHU Zhengjia<sup>1</sup>, REN Yun<sup>2</sup>, HE Yanhua<sup>2</sup>, TANG Liangrui<sup>2</sup>

(1. State Power Limited Company Jibei Economic Research Institute, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In power distribution systems, the high coverage of the terminals and the low energy consumption of the network are two contradictory goals in the planning of the distribution wireless communication network. A network planning method is proposed considering the optimal coverage of the green wireless network. By using the two planning factors, coverage and energy consumption, as the positive and negative correlation factors in the planning model, a multi-objective optimization model is established. And a distribution planning algorithm is proposed to get the optimum solution. Simulation results show that the proposed scheme can effectively guarantee the high coverage of the terminals while keeping the network energy consumption of the deployed base station planning at a low level.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507063) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China.

**Key words:** distribution wireless communication network; heterogeneous network; base station planning; green network; optimal coverage

## 0 引言

近年来, 随着配电系统的快速发展, 配电通信网络的骨干网络已基本实现光纤覆盖, 然而在接入网层面, 无线网络仍然是电力通信的重要补充, 而建立多种无线通信技术异构融合的网络, 以满足多种业务的 QoS 需求成为了无线通信的重要架构方式<sup>[1-7]</sup>。

目前对于异构无线网络的规划方法主要是通过

建立单一规划目标, 通过优化这一规划目标得到基站站址集合<sup>[8-9]</sup>。文献[10]参考传统同构网络规划的思路, 以网络负载量的效益函数作为优化的目标, 提出了一种较为通用的异构网络规划方法。文献[11]提出一种考虑网络能效的微基站规划策略。该策略在宏基站位置已知的前提下, 以微基站候选地址集合作为需要优化的对象, 并以吞吐量和能耗的比值作为能效目标, 在满足网络最低流量需求的限制条件下, 采用遗传算法求解微基站的站址部署解。但是随着基站部署密度的增大, 尤其是微基站更加密集的部署, 成本也成为网络规划所关注的重点。文献[12-14]主要研究了成本因素对于网络规划结果的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51507063); 国家电网科技项目资助

影响。文献[12]在成本受限的约束条件下的异构网络基站规划, 提出一个流量需求最大化的优化模型, 利用贪婪算法从候选基站中求解, 得出能够满足流量最大化的基站集合。而文献[13]则直接以成本最小作为网络规划的目标, 实现最小化成本的规划。因此, 目前的异构无线网络在规划过程中仅仅以能效、成本等单一因素为优化目标, 缺乏对于配电无线网络规划的多方位因素的衡量, 所得到的网络规划方案对于配电通信网络的适用程度较低。

为此, 本文提出一种绿色无线网络覆盖最优的方法, 以网络覆盖率和能耗为目标, 建立多目标优化模型, 并通过遗传算法求解最优基站站址集合。该方法能够有效解决配电通信网中覆盖终端数量多、分布广的特点, 同时能够缓解随着终端数量增加而导致的基站能耗增加的问题。

## 1 配电无线通信网的业务需求

配电无线通信网络主要部署在配电子站与配电终端之间的接入网层, 智能配电异构无线融合网络的架构如图1所示, 采用多层网络覆盖的拓扑。系统主要由配电子站层、异构无线网络和配电网终端设备构成。

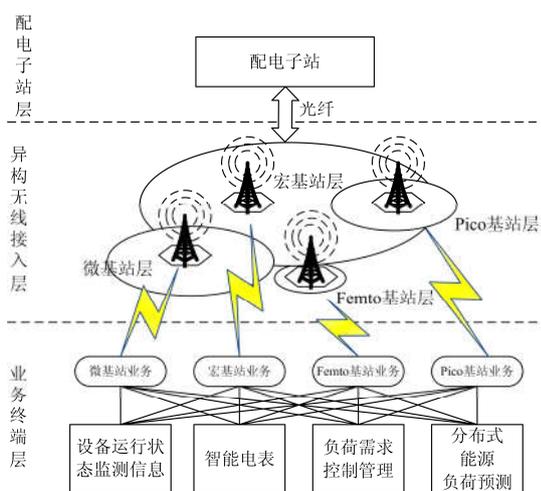


图1 智能配电异构融合网络架构

Fig. 1 Smart power distribution heterogeneous communication network architecture

配电子站层具有通信汇集和监控功能, 其负责所辖区域内配电终端的数据采集、处理、转发、控制及应用。接入网层主要包含宏基站、微基站、Pico基站和Femto基站等不同类型基站组成的分层网络, 为配电终端提供接入服务, 并通过骨干光纤传输至配电子站层。业务终端层主要包括了采集各类配电通信网业务的通信终端, 并其在软件和硬件上

都可以支持多种通信模式。智能配电网与通信相关的各类终端, 主要根据终端分布位置与业务占用带宽等因素将业务终端接入不同异构网络中进行传输。业务终端层中, 分布式能源负荷预测主要是为了解决系统负荷稳定性较弱的问题, 用于预测负荷的变化趋势。其曲线通常15 min采集一次, 通信时延为分钟级, 通信带宽约为5 kbps。负荷需求管理主要针对大负荷用户的特殊需求和影响, 需要进行负荷需求侧管理, 其带宽为5 kbps级别, 通信时延为分钟级。电力用户智能电表实时采集用户用电量信息, 各智能家电用电功率、状态等信息给配电调度, 向用户传送实时电费、分时电价、智能家电控制等信息。每个智能电表通过电缆等方式汇聚到台区集中点, 再通过配电通信网上送, 每个集中点通信带宽约为5 kbps。设备运行状态检测通信主要用于监测设备线路运行状态, 所需带宽为20~100 kbps, 一般情况下, 64 kbit/s可满足需求, 通信时延为秒级<sup>[15-17]</sup>。

综上所述, 配电无线通信网中的业务特性主要包括三方面: 1) 单点通信带宽基本为5 kbps左右, 有部分为64 kbps; 2) 需要保证业务数据通信的不间断和高可靠性; 3) 流量持续时间长, 总流量大。

因此, 针对配电无线通信网业务的特性需求, 主要将针对5 kbps带宽以及部分64 kbps业务进行异构网络规划, 规定最低覆盖概率, 保证业务在选择接入网过程中不限制接入网络的数量, 而是能够自由切换达到数据通信不间断, 使得业务能够持续可靠传输。

## 2 系统模型

配电通信网业务对于可靠性的要求相对于一般网络较高, 同一时刻单一接入一个基站而没有备用接入选择的做法会降低业务可靠性。因此, 定义业务接入基站的指示函数为

$$ID_{n,k,m} = \begin{cases} 1 & R_{n,k,m} \geq R_{\min,n} \\ 0 & R_{n,k,m} < R_{\min,n} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R_{\min,n}$ 表示满足该配电业务 $n$ 所需的最小速率;  $R_{n,k,m}$ 表示业务 $n$ 在接入位置 $m$ 处的 $k$ 层基站时所能达到的业务速率。该指示函数对于业务选择基站的数量和类型不作限制, 只考虑业务速率的可满足与否, 为业务提供多种候选的接入可能, 可提高业务接入的可靠性。

在接入位置 $m$ 处的 $k$ 层基站时所能达到的业务速率, 计算公式为

$$R_{n,k,m} = BD_n \times \log(1 + \text{SINR}_{n,k,m}) \quad (2)$$

式中:业务  $n$  所需带宽为  $BD_n$ , 本文中主要以 5 kbps 和 64 kbps 业务为主;  $SINR_{n,k,m}$  为信噪干扰比。

根据业务接入基站的指示函数, 可以得到业务接入基站情况矩阵

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1M} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2M} \\ \vdots & \vdots & b_{nm} & \vdots \\ b_{N1} & b_{N2} & \cdots & b_{NM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $b_{nm} = \sum_{k=1}^K (a_{km} \times ID_{n,k,m})$  表示业务  $n$  能够选择接入的基站个数,  $a_{km}$  表示基站选择部署的情况, “1”表示在位置  $m$  处部署  $k$  层的基站, “0”表示在位置  $m$  处不部署  $k$  层基站。

根据网络规划因素对于网络的影响, 将网络规划影响因素分为正相关因素和负相关因素。正相关因素主要指随着相关指标数值增加而带来性能提高的网络规划因素, 旨在提高该类因素的数值, 如网络的负载量、网络覆盖率等。负相关因素则反之, 在因素的数值增加的同时会带来额外的负担, 旨在降低该类因素的数值, 如基站总体能耗和成本等。在配电无线通信网中覆盖和能耗是最重要的两个考虑因素, 因此分别将其作为正相关因素目标和负相关因素目标建立多目标优化模型, 如下所述。

#### 1) 正相关因素目标——覆盖率

覆盖率包括终端覆盖率和区域面积覆盖率。由于配电通信终端一般不存在移动性, 因此, 区域面积覆盖率在配电无线通信网中不作考虑。而配电通信网中已存在的终端一般已有合适的接入方式, 因此, 无线网络规划中一般不用保证终端的 100% 覆盖。因此, 设计覆盖率指标反应规划的网络对于现有终端的覆盖情况, 以使得网络能够尽可能满足终端覆盖要求。覆盖率定义如式(4)所示, 表示网络覆盖的终端占区域内所有终端个数的比例。

$$f_{\text{cov}}(\mathbf{B}) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N b_{nm}}{N} \quad (4)$$

#### 2) 负相关因素目标——能耗

无线网络的总能耗主要是由无线基站产生的, 其组成为各层各个基站各自能耗的总和。根据文献[18-20]可知, 单个基站的能耗组成可用  $P_0 + \Delta p \cdot P_{\text{out}}$  表示。因此, 能耗计算如式(5)所示。

$$f_{\text{power}}(\mathbf{B}) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K [(P_{0,k} + \Delta p_k \cdot P_{\text{out},k}) \times a_{km}] \quad (5)$$

式中:  $P_{0,k}$  表示第  $k$  层基站的固定功率;  $\Delta p_k$  为第  $k$  层基站的负载斜率;  $P_{\text{out},k}$  为第  $k$  层基站的发射功

率;  $a_{km}$  表示基站选择部署的情况, 用于辅助求出各个位置的基站各自能耗的总和。

优化模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} \max O_{\max}(\mathbf{B}) = f_{\text{cov}}(\mathbf{B}) \\ \min O_{\min}(\mathbf{B}) = f_{\text{power}}(\mathbf{B}) \\ \text{st1: } f_{\text{load}}(\mathbf{B}) \geq T_{\text{load}} \\ \text{st2: } f_{\text{cov}}(\mathbf{B}) \geq T_{\text{cov}} \\ \text{st3: } f_{\text{power}}(\mathbf{B}) \leq T_{\text{power}} \\ \text{st4: } f_{\text{cost}}(\mathbf{B}) \leq T_{\text{cost}} \\ \text{st5: } \sum_{n=1}^N (b_{nm} \times R_{n,k,m}) \leq R_{\max,k,m} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_{\text{load}}$  为负载量门限;  $T_{\text{power}}$  表示网络总能耗门限;  $T_{\text{cov}}$  表示最低覆盖门限;  $T_{\text{cost}}$  为网络建设的总规划成本门限;  $\max O_{\max}(\mathbf{B})$  为正相关因素优化目标;  $\min O_{\min}(\mathbf{B})$  为负相关因素优化目标; st1~st4 分别为正负相关因素的限制条件, 其中, st1 为网络的最低负载量限制条件, 为了保证规划的网络能够满足网络承载的最基本需求, st2 为最低覆盖率限制条件, 为了能够最大程度地实现终端接入的要求, st3 为能耗限制条件, 为了能够将网络能耗有效控制一定范围内, st4 为最大成本限制条件, 为了有效控制网络的建设成本; st5 为网络速率限制条件, 为了保证网络在完成承载的同时也能够完整提供速率服务;  $R_{\max,k,m}$  为  $m$  处部署  $k$  层基站所能达到的最大服务速率。

### 3 配电异构网络规划算法

本节将最大化异构网络的正相关因素和最小化负相关因素两个矛盾的优化目标作为多目标优化模型的目标函数, 但是由于这两个优化目标相互矛盾, 不能单独优化某一个或者某几个目标而不损害其他目标。因此, 本文所提的配电异构网络规划算法首先利用多目标优化方法对优化模型求解得到一组最优解, 即 Pareto 解集, 然后, 通过折中筛选策略得到最终的规划结果。具体的算法的流程如图 2 所示。

1) 遗传编码。由于将业务接入基站情况矩阵  $\mathbf{B}$  直接进行二进制展开会导致码长过于长, 大大增加算法求解的时间。而实际产生影响的是基站的站址集合, 因此, 可以通过对站址集合进行编码, 从而计算得出  $\mathbf{B}$ , 再进行优化。因此, 将所有基站进行  $K+1$  进制编码, 每位编码的“1~ $K$ ”数值分别对应在该位置部署 1~ $K$  层的基站, “0”对应在该位置不部署基站。每个编码代表一个种群个体解, 多个个体解组成一个种群。

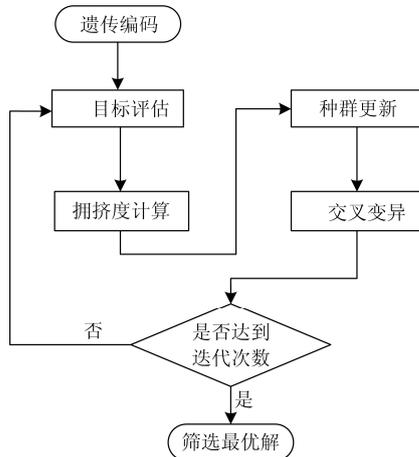


图2 遗传算法流程

Fig. 2 Genetic algorithm procedure

2) 目标评估。为了能够得到满足约束的 Pareto 解集, 目标评估方案需要严格符合约束条件, 但是由于本文的约束条件都为非线性约束, 难以得到有效的可行解集区间。因此, 本文将约束条件作为惩罚函数, 从而有效的避免所得解不在可行解集范围内的情况。惩罚函数即为当优化中间的个体不满足  $st1, st2, st3, st4, st5$  限制条件, 则将对应个体的正相关目标  $O_{\max}(\mathbf{B})$  设为  $-\infty$ , 负相关目标  $O_{\min}(\mathbf{B})$  设为  $+\infty$ 。

3) 通过拥挤度计算、种群更新以及交叉变异操作, 得到 pareto 最优解集。

4) 筛选最优解。通过多目标遗传算法最终得到模型的最优解集, 并对于解集进行单一最优解筛选。将生成的解集进行解码, 根据式(7)转换为对应的业务接入基站情况矩阵。

$$\mathbf{B}^* = \arg \min \left\{ -\frac{O_{\max}(\mathbf{B}_j^*)}{O_{\max}} + \frac{O_{\min}(\mathbf{B}_j^*)}{O_{\min}} \right\}, j = 1, 2, \dots, J \quad (7)$$

式中:  $J$  是最优解集中解的个数;  $O_{\min}$  是最优解集中的最小负相关因素值, 即  $O_{\min} = \min O_{\min}(\mathbf{B}_j^*)$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ ,  $O_{\max}$  是最优解集中的最大正相关因素值, 即  $O_{\max} = \max O_{\max}(\mathbf{B}_j^*)$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ 。然后将业务选择接入的基站站址进行提取, 得到部署基站的规划结果。

#### 4 仿真结果与分析

以某一中型城市高新开发区的配用电覆盖范围为例, 构建网络仿真环境。根据配电网需求可知, 每个开关需要设置一个馈线终端通信设备(FTU)实现“三遥”功能。变压器需要配备配变终端设备(TTU), 用于监测并记录配电变压器运行工况。为了应对现场信号、工业设备的监测和控制, 需要在区域内安置远程终端单元(RTU)。该仿真场景的规

模约为  $10 \times 10 \text{ km}^2$ , 区域内共有 22 个候选基站地址, 共有约 900 个配用电终端, 其中 5 kbps 带宽业务占 80%, 64 kbps 带宽业务占 20%, 设置负载量的最低门限  $T_{\text{load}}$  为 2000, 最低覆盖门限  $T_{\text{cov}}$  为 90%, 网络总能耗的最高门限  $T_{\text{power}}$  为 2 500 W, 最高成本门限  $T_{\text{cost}}$  为 1 000 万元。

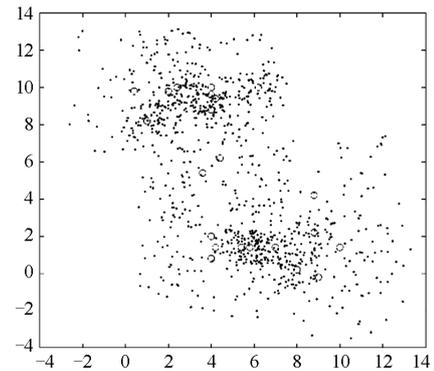
基站参数设置参考了 EARTH(Energy Aware Radio And Network Technologies)项目的能耗研究报告<sup>[18]</sup>, 为减少仿真复杂度, 设置了两层网络基站参数, 如表 1 所示。

表 1 基站参数

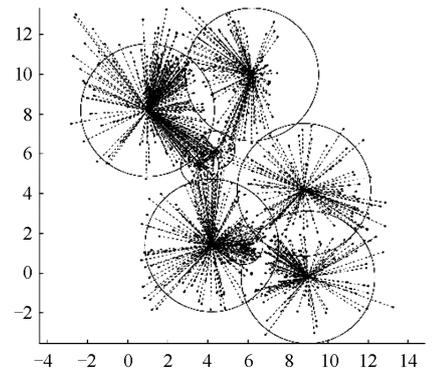
Table 1 Network base station parameter

参数	宏基站( $k=1$ )	微基站( $k=2$ )
$P_{\text{out},k,j} / \text{W}$	20	6.3
$P_{0,k,j} / \text{W}$	130.0	56.0
$\Delta p_{k,j}$	4.7	2.6
$R_{\text{max},k} / \text{bps}$	5 000	1 000

仿真过程中, 将多目标遗传算法的参数分别设置为: 种群规模  $L_d=50$ , 最大迭代次数  $T_{\text{max}}=200$ , 优势种群比例  $a\%=20\%$ , 变异概率  $b\%=20\%$ 。图 3 为优化模型的最终基站规划结果。



(a) 仿真场景



(b) 部署基站后各个终端和基站的连接情况

图 3 基站规划结果

Fig. 3 Base station planning results

图 3(a)为仿真场景, 候选基站位置(空心圆 O)和终端分布位置(实心点·)部署于一个约为  $10 \times 10 \text{ km}^2$  的方形区域内。图3(b)为部署基站后各个终端和基站的连接情况。从规划结果中可以看出, 规划结果基本覆盖了区域内大部分的终端点, 实际覆盖率达到 93.03%, 其中, 宏基站主要用于大范围覆盖终端, 部署的 5 个宏基站覆盖了区域内大部分的终端, 而部署的 3 个微基站主要分布在宏基站的边缘区域, 以及宏基站内部终端密集的区域。这是由于宏基站由于其发射功率较大, 因此覆盖半径远远大于微基站, 会使得宏基站尽量分散, 从而覆盖更多的终端。而在宏基站边缘区域, 由于宏基站距离较远, 终端接收到的宏基站发射功率较弱, 因此造成终端接收信噪干扰比较小, 终端业务速率得不到满足, 因此需要部署微基站提供覆盖。而在宏基站终端密集区域, 也称热点区域, 由于区域内终端较多, 导致带宽不足, 因此采用微基站提供额外的复用带宽, 从而减少宏基站的负担。

图 4 表示本文的规划结果和其他方法的网络基站规划结果在能耗上的对比。其中模型①~③分别为: ① 承载和能耗; ② 覆盖率和成本; ③ 承载和成本作为优化目标的模型, GSBDA 和 MCCP 分别是文献[10, 12]中所提出的方法。从图中可以看出, 本文方法和其他三种模型的规划结果在能耗上较大程度地优于 GSBDA 和 MCCP, 这是由于 GSBDA 是传统的以负载量作为目标的规划方法, 该规划方法会倾向于采用负载量较大的宏基站覆盖区域, 从而导致能耗的增加。而 MCCP 则以网络建设成本最低为目标, 因此, 会大量采用成本较低微基站进行覆盖区域, 随着微基站数量的增加, 能耗也大大增加。而本文方法和模型②在能耗方面有着最优的表现, 其相同点是以覆盖率作为正相关规划因素目

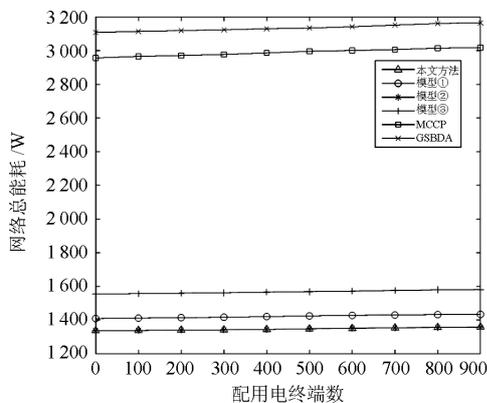


图 4 网络能耗对比

Fig. 4 Network energy consumption comparison

标, 并以成本或者能耗作为负相关规划因素目标限制基站的数量, 从而达到能耗的最优。从而可以看出, 覆盖率是最小化网络能耗的关键因素。而在模型①和模型③中, 由于负载量并不是影响网络能耗的最关键因素, 因此得到的规划结果并不能达到最低值, 同时可知负相关因素中, 相对于成本目标, 能耗目标对于最小化网络能耗的影响更强。

图 5 为网络覆盖概率的对比, 表明了基站覆盖范围内, 终端 SINR 的分布情况。从图中可以看出本文的优化模型的规划结果较其他几种方法的规划结果, 始终保持较高的覆盖概率。这是由于 GSBDA 方法的规划模型是以基站的用户服务数量, 也就是负载量, 作为评价规划性能的唯一标准, 这样做会使得基站的规划向用户较多的热点区域靠拢, 从而增加了该区域的干扰, 降低了覆盖概率的性能。MCCP 方法是以规划成本作为网络规划唯一的目标, 这样做会导致网络规划结果更倾向于采用成本更低的微基站, 微基站的发射功率较小, 且微基站部署密集, 造成了网络内干扰较大, 终端在接收端的 SINR 性能较差。而本文提出的方法以覆盖率和能耗作为两个目标, 一方面采用宏基站保证覆盖的功率, 另一方面以成本为目标减少基站的数量, 从而能够减少密集部署的基站对于终端的干扰, 提高了覆盖概率, 使得网络的覆盖概率表现远远好于 GSBDA 方法和 MCCP 方法, 同时也能够优于模型①~③的表现。

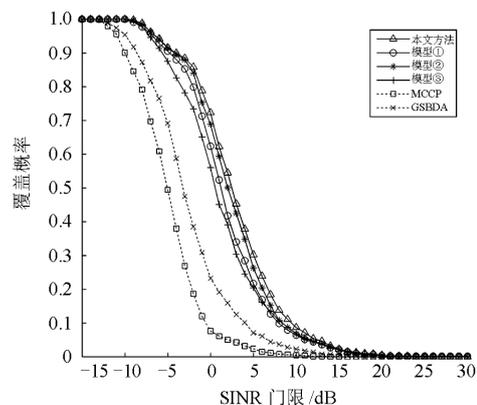


图 5 覆盖概率对比

Fig. 5 Coverage probability comparison

表 2 为不同规划模型下成本的对比结果。由于基站的运行成本计算相对复杂, 因此成本对比主要以网络基站的建设成本进行对比。对比结果显示, 除了 GSBDA 方法外, 其他方法均在成本限制范围内, 而且保持一个较低且较接近的水平。MCCP 虽然以成本作为目标但是并没有达到最低成本, 这是

因为MCCP方法中宏基站的部署是为了满足了网络的负载率,因而在宏基站的部署成本部分与其他几种方法相差不大,但是,终端位置的分散使得MCCP模型部署了更多的微基站,造成了微基站部署的成本部分相对其他几种方法较高。本文方法和模型①以及模型②的成本均为最低的530万元。模型③的成本较本文方法多了一个微基站的成本。因此,可知在该仿真场景下,5个宏基站和3个微基站的部署方案是最节省成本的部署方式。

表2 成本对比

	宏基站数量/ (100万/个)	微基站数量/ (10万/个)	成本/万元
本文方法	5	3	530
模型①	5	3	530
模型②	5	3	530
模型③	5	4	540
MCCP	5	9	590
GSBDA	10	2	1 020

图6为负载量的对比,展示了网络提供的终端业务承载能力。从图中可以看出,承载能力随着配电业务数的增加而增加,当配电业务数量达到最终的900个时,六种方法均能够达到设定的最低负载 $T_{load}=2000$ 的要求。而GSBDA方法由于仅以网络的负载量作为目标,而不考虑其他因素的最优化,从而使得负载量达到最大化,故负载量的值在六种方法中是最大的。由于其他方法在满足最低负载的同时,还有能耗和成本等因素的制约,为了兼顾这些因素,会以牺牲负载量的部分性能来满足其优化目标的性能。本文方法以部分负载性能为代价以达到网络覆盖率,能耗和成本方面的最优,有效地协调了网络中这三个方面的性能。

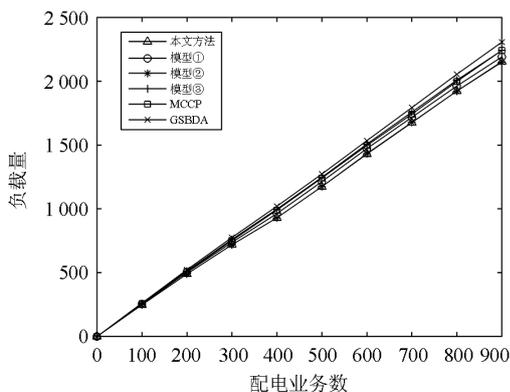


图6 负载量对比

Fig. 6 Load comparison

## 5 总结

本文提出了一种配电无线通信网的基站规划策略,以实现配电无线通信网覆盖和能耗需求。在分析了配电无线通信网业务需求的基础上,将规划因素分为正相关因素与负相关因素两类,分别以覆盖率和能耗作为正负相关因素的目标,通过建立多目标优化模型,并采用遗传算法求解最优解集,筛选得到最终的规划结果。仿真结果表明,本文提出的以覆盖率和能耗作为优化目标的多目标优化模型,能够最大程度地满足网络规划对于所选择的正相关和负相关因素目标的要求,同时满足了网络中业务对于带宽和网络可靠性的要求,对于目前的配电无线通信网的规划具有现实的应用价值。

## 参考文献

- [1] 李晨光,王芸波,刘太学. 无线通信技术在智能配电网中的应用研究[J]. 中国电力教育, 2010, 30(27): 258-260.  
LI Chenguang, WANG Yunbo, LIU Taixue. Research on application of wireless communication technology in intelligent distribution network[J]. China Electric Power Education, 2010, 30(27): 258-260.
- [2] 盛洁. 面向智能配电的异构融合网络无线资源管理[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
SHENG Jie. Radio resource management in heterogeneous integrated networks oriented to smart distribution grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [3] 李映雪,朱文广,黄超,等. 基于自组织临界性的电力异构通信网络稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 118-122.  
LI Yingxue, ZHU Wenguang, HUANG Chao, et al. Study on stability of power heterogeneous communication network based on self-organized criticality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 118-122.
- [4] Amaldi E, Capone A, Cesana M, et al. WLAN coverage planning: optimization models and algorithms[C]// Vehicular Technology Conference, May 17-19, 2004 IEEE, Milan Italy: 2219-2223.
- [5] Plets D, Joseph W, Vanhecke K, et al. Exposure Optimization in Indoor Wireless Networks by Heuristic Network Planning[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 139: 445-478.
- [6] Kaneko S, Matsunaka T, Kishi Y. A cell-planning model for HetNet with CRE and TDM-ICIC in LTE-advanced[C]//Vehicular Technology Conference, May 6-9, 2012, Yokohama Japan: 1-5.

[7] Damjanovic A, Montojo J, Wei Y, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. *Wireless Communications IEEE*, 2011, 18(3): 10-21.

[8] ZHAO W, WANG S, WANG C, et al. Approximation algorithms for cell planning in heterogeneous networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(2): 1561-1572.

[9] 林飞. 移动 4G 微小基站网络规划的探讨[J]. *信息通信*, 2016(8): 243-244.  
LIN Fei. Mobile 4G micro base station network planning[J]. *Information and Communication*, 2016(8): 243-244.

[10] YAACOUB E, IMRAN A, DAWY Z. A generic simulation-based dimensioning approach for planning heterogeneous LTE cellular networks[C] // *Mediterranean Electrotechnical Conference: IEEE*, 2014: 320-326.

[11] LI X, ZHANG X, WANG W. An energy-efficient cell planning strategy for heterogeneous network based on realistic traffic data[C] // *Computing, Management and Telecommunications (ComManTel)*, 2014 International Conference on: IEEE, 2014: 122-127.

[12] WANG S, ZHAO W, WANG C. Budgeted cell planning for cellular networks with small cells[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(10): 4797-4806.

[13] ZHAO W, WANG S, WANG C, et al. Cell planning for heterogeneous networks: an approximation algorithm[C] // *IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications*, 2014: 1087-1095.

[14] 刘宁, 秦志光, David Plets,等. 基于混合算法的多目标异构无线网络室内规划[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(9): 2774-2777.  
LIU Ning, QIN Zhiguang, David Plets, et al. Multi-target heterogeneous wireless network indoor planning based on hybrid algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(9): 2774-2777.

[15] 黄盛. 智能配电网通信业务需求分析及技术方案[J]. *电力系统通信*, 2010, 31(6): 10-12.  
HUANG Sheng. Analysis on the demand for communication services in smart distribution network and communication technical scheme[J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2010, 31(6): 10-12.

[16] 陈晓杰, 徐丙垠, 陈羽, 等. 配电网分布式控制实时数据快速传输技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(17): 151-158.  
CHEN Xiaojie, XU Bingyin, CHEN Yu, et al. Real-time data fast transmission technology for distributed control of distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(17): 151-158.

[17] 凌光, 许伟国, 王志亮, 等. 基于 EPON+的高可靠性固定时延网络在智能变电站应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(14): 89-94.  
LING Guang, XU Weiguo, WANG Zhiliang, et al. Research on communication architecture of smart substation with characteristic of high reliability and fixed latency based on EPON+[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(14): 89-94.

[18] AUER G. Deliverable D2.3 “Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown”[R]. *INFSO-ICT-247733 EARTH (Energy Aware Radio and NeTwork TecHnologies)*, 2010.

[19] 王晓勇. 配电自动化系统中通信网络的规划与组建[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.  
WANG Xiaoyong. Planning and construction of communication network in distribution automation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Communications, 2013.

[20] 苏浩益, 贺伟明, 吴小勇, 等. 配电自动化系统中无线通信方式优选模型[J]. *电力信息与通信技术*, 2014, 12(3): 29-34.  
SU Haoyi, HE Weiming, WU Xiaoyong, et al. Optimization model for wireless communication modes in distribution automation systems[J]. *Electric Power Information Technology*, 2014, 12(3): 29-34.

收稿日期: 2017-03-16; 修回日期: 2017-09-14

作者简介:

李 莉(1979—), 女, 高工, 研究方向为电力通信网智能化与自动化规划技术; E-mail: jbjyyl@126.com

朱正甲(1987—), 男, 工程师, 研究方向为电网智能化与自动化规划技术; E-mail: zhu.zhengjia@jibei.sgcc.com.cn

贺艳华(1992—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为无线异构网络资源管理等。E-mail: yanhuahe91927@163.com

(编辑 姜新丽)