

分布式天线系统中的天线位置优化

胡钰林, 邱玲

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 分布式天线系统(DAS)的天线位置直接决定着系统无线覆盖的可靠性和高效性性能. 讨论如何在满足用户通信质量需求的前提下, 通过优化天线位置来提高天线效率, 使系统更加绿色. 首先推导了 DAS 基于无线覆盖可靠性和高效性的天线效率公式, 并提出基于这两种天线效率的相应天线位置优化方法. 分析和仿真结果表明, 通过优化天线位置, 可以减少小区内的天线数目或最小化其平均最小接入距离, 以提高天线效率、最小化系统总发射功率和降低布网成本.

关键词: 分布式天线系统; 虚拟小区; 天线位置优化; 接入距离

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A

Optimal antenna location for distributed antennas in DAS cells

HU Yu-lin, QIU Ling

(PCN&SS Lab, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The antenna location of the distributed antenna system (DAS) determines the system's performance. Under the condition of satisfying the users' needs for QoS, the DAS antenna efficiency was first defined and then different methods were adopted to optimize the antenna position so as to reduce the number of antennas and/or minimize the average minimum access distance, thus improving the antenna efficiency and ultimately reducing the cost and the total transmission power of the system. The analysis and simulation results show that the methods have achieved excellent performance.

Key words: DAS; virtual cell; optimal antenna location; access distance

0 引言

分布式天线系统(DAS)已成为 B3G 系统组网架构的研究重点之一. 在这种新型网络架构下, 大面积的分布了许多远端天线, 这些天线用光纤、同轴电缆或微波链路连接到中央处理器^[1,2]. DAS 的系统结构是开放的, 它的天线的位置和资源分配很灵活. 天线只用来收发信息, 所有的处理过程都有与之相连的中央处理器完成, 所以 DAS 的天线很小且成本

很低, 这使得其具有“移动性”, 于是其位置优化便成为可能. 随着天线数的增加, DAS 用户不再需要和小区内所有的天线通信就能满足其通信质量需求, 当用户只和一部分天线通信时, 就出现了虚拟小区的概念^[3].

虚拟小区的天线一般都会选择距离用户较近的天线, 所以可以极大地缩短无线信号的传输距离, 进而在很大程度上节省了基站和用户的发射功率. 文献^[1]基于最大的最小接入距论证了 DAS 的发射总

收稿日期: 2009-05-12; 修回日期: 2009-09-16

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX03003-004)和中国瑞典第四代及超前无线通信技术战略合作项目(2008DFA12160)资助.

作者简介: 胡钰林, 男, 1987年生, 硕士. 研究方向: 分布式天线系统 MIMO-relay、协作通信. E-mail: huyulin@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 邱玲, 博士/教授. E-mail: lqiu@ustc.edu.cn

功率上限比 CAS 要低很多. 然而, 即便同是 DAS, 天线的位置不同也会使得系统的接入距离不同, 进而总发射功率也会有差异. 目前, DAS 系统的天线部署方案主要有两类: 均匀分布天线^[1,2], 和随机分布天线^[4~6]. 本文根据[1]中提出的“最大最小接入距离”和本文提出的“平均最小接入距离”进行讨论, 定义了基于这两种不同接入距离的天线效率. 最大的最小接入距离考虑的是最坏情况下的用户接入距离, 其相应天线效率考虑的是系统的可靠性, 我们定义为可靠性天线效率; 而后者讨论的是所有用户的接入距离的均值, 所以其相应的天线效率更多是衡量系统的高效性, 我们定义为高效性天线效率. 本文基于这两种定义的天线效率, 获得 DAS 系统的天线最优部署方法.

首先, 本文提出的基于可靠性天线效率最优的优化方法, 不仅适用于天线数为自然数的平方的特殊场景, 还适用于天线数任意的普通场景. 可靠性天线效率最优的天线分布方案与其他的均匀分布方案^[1]相比, 前者使用更少的天线获得相同或更小的“最大的最小接入距”, 提高了系统资源利用率; 且前者具有更小的平均最小接入距, 降低了系统总发射功率, 使系统更加绿色.

其次, 本文提出的基于高效性天线效率最优的天线分布优化方案, 既不是简单的随机分布, 同时也摆脱了天线均匀分布的限制. 它尽可能地将天线贴近用户分布, 在天线数目不变的情况下, 实现最小的平均接入距离, 大大降低了系统的总发射功率, 得到最高的高效性天线效率.

文章内容安排如下: 节 1 提出了平均最小接入距的概念和计算方法, 以及基于这种接入距离和最大的最小接入距的天线效率; 并在此基础上, 对几种典型的 DAS 小区的天线分布方式进行了分析和比较. 节 2 首先推导出六边形小区中可靠性天线效率达到极限的天线分布方案及其天线数目限制条件; 进而提出了在任意天线数下的可靠性天线效率最优的天线位置优化方法; 最后提出了基于高效性天线效率最大的 DAS 小区天线位置优化方案. 最后, 本文给出优化实验的仿真结果和结论.

表 1 $N = 1$ 时 DAS 不同天线排列时的最大的最小接入距离

Tab. 1 The maximum minimum access distance of several different scenarios of DAS when $N = 1$

L	4	9	16a	16b	64	78	81
d_m	0.707 106 8R	0.333 33R	0.375 95R	0.25R	0.125 0R	0.115 47R	0.111 1R

1 接入距离和天线效率

图 1 是几种常见的 DAS 天线均匀分布格局^[1,2]. 本节将首先讨论比较这几种均匀分布方案的最大最小接入距和平均最小接入距, 进而引入两个天线效率公式, 并比较图 1 中各个方案的天线效率.

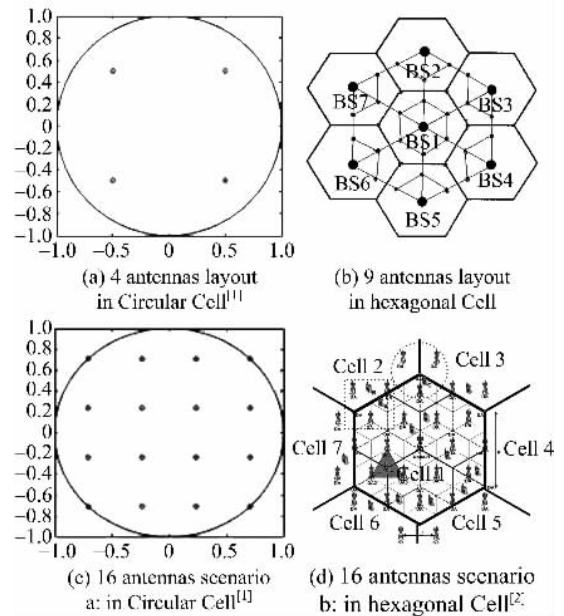


图 1 几种常见的天线部署方式

Fig. 1 The antennas layout of several common ways

若 L 表示总天线数目; R 为小区半径, 对于形状不规则的小区而言, R 为能覆盖这个小区的最小圆的半径; N 为与用户通信的虚拟小区的天线点数目; d_m 为文献[1]提出的最大的最小接入距离. 可以得到一个用户只和一个天线点通信时, 几种常见分布的 d_m , 如表 1 所示.

同理可得 $N = 2, 3, 4$ 时的最大最小接入距离如表 2 所示.

定义 1.1 平均最小接入距 d_a 为用户的最小接入距离的均值

$$d_a = E(d) = \iint_{\text{all the possible points in cell}} d(x, y) \cdot f(x, y) dx dy = \iint \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \cdot f(x, y) dx dy \quad (1)$$

表 2 $N = 2, 3, 4$ 时 DAS 不同天线排列时的最大的最小接入距离

Tab. 2 The maximum minimum access distance of several different scenarios of DAS when $N = 2, 3, 4$

N	d_m						
	L=4	L=9	L=16a	L=16b	L=64	L=78	L=81
2	1.000 0R	0.577 3R	0.471 4R	0.433 0R	0.211 5R	0.2R	0.192 5R
3	1.154 7R	0.577 3R	0.544 3R	0.433 0R	0.211 5R	0.2R	0.192 5R
4	1.154 7R	0.577 3R	0.544 3R	0.433 0R	0.211 5R	0.2R	0.192 5R

$d(x, y)$ 是接入距离; $f(x, y)$ 是用户分布的概率密度函数,它需要先验知识. 在不知道小区内部用户分布时,我们可以假定用户是服从均匀分布的,则 $N=1$ 时,几种常见分布下的 d_a 如表 3 所示.

表 3 $N = 1$ 时的平均最小接入距离

Tab. 3 The average minimum access distance of several scenarios of DAS when $N = 1$

L	4	9	16a	16b
d_m	0.4717 718R	0.194 998R	0.222 397 896R	0.146 248 5R

定义 1.2 天线效率

基于最大的最小接入距离 d_m 的天线效率为:

$$\eta_{reliability}^d = \frac{R}{d_m \sqrt{L}} \cdot \frac{S_{cell}}{\pi R^2} \quad (2)$$

基于平均的最小接入距离 d_a 的天线效率为:

$$\eta_{efficiency}^d = \frac{2R}{3d_a \sqrt{L}} \cdot \left(\frac{S_{cell}}{\pi R^2} \right)^2 \quad (3)$$

分别称上述两天线效率为可靠性天线效率、高效性天线效率. S_{cell} 是小区的面积,公式对不同形状的小区进行面积归一化,使得其可以衡量不同形状的小区的天线性能. 可以看出,天线效率与接入距与半径的比值、天线数目成反比. 可靠性天线效率能衡量天线部署方案对减少用户接入距上限做出贡献的大小,讨论该方案减小最远接入距离的能力,度量系统的可靠性;高效性天线效率衡量的是部署方案降低系统 d_a 的能力、对减少用户接入距均值做出的贡献,其度量的是系统的高效性.

根据定义,几种常见的 DAS 天线分布方式下的天线效率如表 4 所示.

定理 1.3^① 对于用户均匀分布的 DAS 系统而言,两种天线效率的上限都是 100%;但永远达不到 100%.

证明过程如下:相同的平均接入距离实现最大的覆盖面积的小区是圆形小区,面积为 πR^2 . 部署 L

表 4 $N = 1$ 时的天线效率

Tab. 4 The antenna of several scenarios of DAS when $N = 1$

L	4	9	16a	16b
$\eta_{reliability}^d$	70.71%	82.67%	66.50%	82.67%
$\eta_{efficiency}^d$	70.65%	77.92%	74.94%	77.92%

【注】假定用户均匀分布;保留到 4 位有效数字

个天线点,理想的高效利用天线覆盖的面积分配方案是:等覆盖面积分配. 于是每个天线点的覆盖面积为 $\pi R^2/L$. 对于每个天线点而言,覆盖相同的面积时,能够得到最小的平均接入距离的覆盖方案,也是圆形覆盖. 那么理想的最大的最小接入距 $d_{m_{ideal}}$ 和 R 的关系为: $\pi R^2/L = \pi d_{m_{ideal}}^2$, 于是有

$$d_m \geq d_{m_{ideal}} = R/\sqrt{L} \quad (4)$$

所以对于形任意形状的小区而言,可靠性天线效率的上限表述为

$$\eta_{reliability}^d \leq \frac{R}{d_{m_{ideal}} \sqrt{L}} \cdot \frac{S_{cell}}{\pi R^2} \quad (5)$$

而由上述分析可知,理想方案的小区面积为 πR^2 , 于是理想方案的 $\eta_{reliability}^d$ 为

$$\frac{R}{d_{m_{ideal}} \sqrt{L}} \cdot \frac{S_{cell}}{\pi R^2} = \frac{R}{\frac{R}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{L}} \cdot \frac{S_{cell}}{\pi R^2} = 100\%.$$

由公式(4)和(5)可知,当小区形状非圆形时,根据定义对于不规则小区而言,R 为能覆盖这个小区的最小圆的半径,所以很显然有 $S_{cell} < \pi R^2$, 于是对于非圆形小区恒有 $\eta_{reliability}^d < 100\%$.

类似地,可定义其理想化的平均最小接入距离为 $d_{a_{ideal}}$, 于是同样得到

$$d_a \geq d_{a_{ideal}} = \frac{2R}{3\sqrt{L}} \cdot \frac{\pi R^2}{S_{cell}} \quad (6)$$

所以任意形状的小区的高效性天线效率的上限为

① 定理 1.3 说明,理想情况下天线效率才能达到 100%,而实际达不到,表明天线效率的范围是有意义的. 定理中“用户均匀分布”是指,在没有关于用户分布先验知识的条件下,假定小区中每个点都可能等概率地出现用户.

$$\eta_{\text{efficiency}}^d = \frac{3R}{3d_{\text{ideal}} \sqrt{L}} \cdot \left(\frac{S_{\text{cell}}}{\pi R^2}\right)^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{R}{\frac{2R}{3\sqrt{L}} \cdot \frac{\pi R^2}{S_{\text{cell}}} \cdot \sqrt{L}} \cdot \left(\frac{S_{\text{cell}}}{\pi R^2}\right)^2 = \left(\frac{S_{\text{cell}}}{\pi R^2}\right)^3 \quad (7)$$

同理,理想方案的高效性天线效率为 100%;而非圆形小区恒有:高效性天线效率小于 100%。

由分析可知,理想方案是将小圆(天线覆盖区域)无缝无重叠地覆盖在大圆(圆形小区)上;但除非把 DAS 系统退化成 CAS 系统(小圆=大圆),否则无法实现。所以对于 DAS 系统而言,天线效率永远达不到 100%。

2 六边形小区 DAS 的最优天线位置

2.1 基于可靠性的天线位置优化方法

基于高效性的优化方法就要最大化 $\eta_{\text{reliability}}^d$, 我们称优化得到的天线部署方案为基于可靠性天线效率的最优分布。根据节 1 可靠性天线效率的定义,我们知道它是针对任意形状小区而言的,而六边形小区的面积 $S_{\text{cell}}=0.8267\pi R^2$,由公式(4)和(5)可得,它在六边形小区中的上限为

$$\frac{R}{d_{m,\text{ideal}} \sqrt{L}} \cdot \frac{S_{\text{cell}}}{\pi R^2} = \frac{R}{\frac{R}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{L}} \cdot \frac{0.8267\pi R^2}{\pi R^2} = 82.67\%$$

由表 4 可知: $L=9$ 和 $L=16$ 的可靠性天线效率就为 82.67%。也就是说,对于六边形小区,这种分布方式的可靠性天线效率达到了其极限。

定理 2.1 对于六边形小区,可靠性天线效率能够到达极限的条件为:

- ①小区分裂式的天线分布;
- ②天线数为自然数平方。

虽然上述分布的可靠性天线效率能够到达极限,但是它的天线数受限为自然数的平方。如何在天线数目 L_1 为非自然数平方时使得可靠性天线效率最大是需要解决的问题,必须要移动所有的待优化天线来最大化可靠性天线效率。由于每个天线的坐标都要变动,所以当天线数 L_1 很大时,寻优过程会相当复杂。本文在此给出一种简洁直观的优化方法——“放射法”。

仔细观察基于系统可靠性的最优天线分布方案后,不难看出所有天线点是围绕中心天线以 1:6:6:6:12:6:6:12:6:6:12:6:12:12:6……的方式放

射出去的,这些数字代表半径从小到大的各个同心圆上的天线数,如图 2 所示。经计算,可靠性最优分布的这些同心圆的半径之比约为:

$$0:1:1.732:2:2.6456:3:3.4640:3.6053:4:4.3588:4.5824:4.9998:5.1960:5.2914\cdots$$

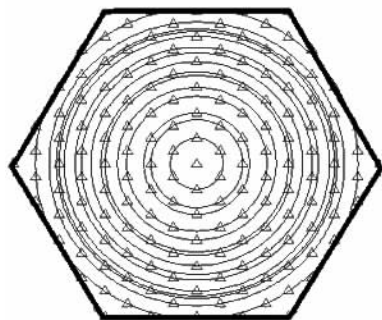


图 2 天线数为 144 可靠性天线效率最优的天线分布

Fig. 2 The optimal layout based on reliability with $L=144$

进而计算出这些同心圆的间距之比为:

$$1:0.732:0.268:0.6456:0.3544:0.4640:0.1413:0.3947:0.3588\cdots \quad (8)$$

假设欲分布天线数 L 为非自然数的平方,具体的放射法如下:

Step 1 找到天线数略小于 L_1 的最优分布方案,记录该方案上述的同心圆层数 n ,天线数 L_1 。

Step 2 进行寻优初始化,部署剩余的 $L-L_1$ 根天线。具体方法如下:记最终需要部署在最内层的天线数为 L_s , L_s 为小于 5 的自然数。加之 Step 1 得到分布的中心天线的位置需要重排,Step 2 实际需要排布的天线数为 $L-L_1+1=6K+L_o$ (K 为自然数)。若 $L-L_1<5$,那么 $L_s=L_o$,直接部署这 L_s 根天线到小区中心。若 $L-L_1>5$,即 $K\geq 1$,则先将 $6K$ 根天线沿着已有部署向外放射式地部署在外侧的同心圆上。因为若 $6K$ 根天线正好得以完全部署,则 $L_s=L_o$;若外围部署需要 12 根天线,而可供部署的 $6K$ 根天线只剩 6 根,那么这六根也要部署在小区的内部,此时 $L_s=L_o+6$ 。在部署这 L_s 根天线时要注意选择适当的角度的位置使得在这一区域 d_m 最小,若 $L_s=L_o+6$,则需要先部署一个正六边形,其余 L_o 根天线部署在六边形内;若 $L_s<6$,这时根据 L_s 的数值进行简单的计算比较就可得到,比如当 $L_s=3$ 时,以正三角形放置,如图 3 所示。

Step 3 根据第二个同心圆内的 d_m 情况进行“放射寻优”,寻优的过程遵循两个原则:首先,要保

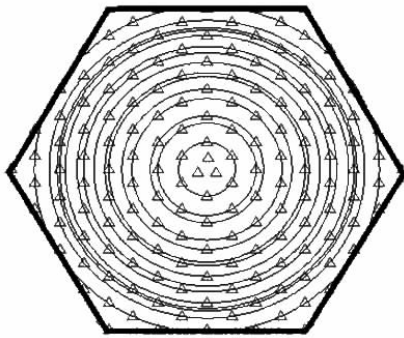


图 3 天线数为 146 可靠性天线效率最优的天线分布

Fig. 3 The optimal layout based on reliability with $L = 146$

证最外侧的天线分布是恒定的(其余位置可以优化的天线称为待优化天线);其次,要保持所有天线极坐标角度恒定,根据最内侧的 L_s 根天线的分布情况,按公式(8)中同心圆间的间距比例向外放射同心圆,其中极坐标的原点是同心圆的圆心。

放射法简单直观,且极大地减少了寻优的试验点数.由于外围天线是按照同心圆间距比例放射移动的,所以这些天线覆盖区域的 d_m 是始终相同的,因此放射法就将变量为 $2L$ 的复合寻优变成了一维函数的寻优,这个一维函数的唯一的变量就是正 L_s 边形的半径.按照此方法我们可以很容易地获得任意天线数的可靠性的最优天线分布,如天线数 $L_1 = 38$ 的 DAS 小区,放射优化后的 d_m 为 $0.197R$,可靠性天线效率为 82.38% ,优化后的天线分布与图 3 类似.可以看出,虽然天线数非特殊的 DAS 的可靠性天线效率不能达到极限值 82.67% ,但其放射寻优的结果已经非常接近这个极限了。

这些可靠性最优的分布与其他方案相比,使用了更少的天线数目覆盖得到相同或者是更小的 d_m .根据定理 2.1,图 1(b)为一种基于可靠性的最优分布,其 d_m 为 $0.33R$.与之相比,图 1(c)方案则需要 16 根天线,然而其 d_m 却高达 $0.37R$.所以,这种天线分布,能提高系统资源的利用率,而且由于减少了天线数目,直接降低布网成本和视觉污染.不仅如此,通过上述比较可以看出,这种最优分布与一些方案相比具有更小的 d_a ,这使得系统总发射功率变得更小,使系统更加绿色。

2.2 基于高效性的天线位置优化方法

基于高效性的天线位置优化方法就要在限制条件下最大化 $\eta_{\text{efficiency}}^d$.我们用 MATLAB 随机地产生了一个 9 天线 DAS 小区的用户分布,半径 $R=1$,仿

真的用户采样点数为 200.用户采样点数既可以代表不同用户的位置,也可以代表同一个用户不同通信时刻的位置.考虑到用户通信的位置具有移动性,所以我们要让优化后的方案在用户分布发生一定范围的变动时仍能得到比较好的增益,所以要设置适当的限制条件来避免天线分布过于集中.本文将天线间距限制在 $[0.2R, 0.8R]$.如图 4 可知,该分布为最优的基于可靠性的分布方式.仿真计算得平均最小用户接入距离为 $d_a = 0.1944R$,此时的高效性天线效率为 78.12% 。

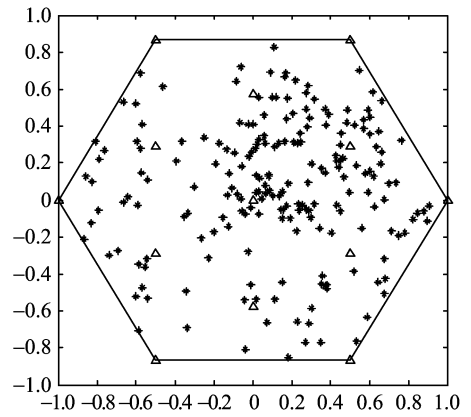


图 4 基于可靠性最优的天线分布方式

Fig. 4 The optimal layout based on reliability

用户的不均匀分布,使得图 4 的天线均匀分布方式不是最高效的.我们以这个系统为例,优化天线位置分布,得到最优的基于高效性的天线分布结果.本文利用改进的 HOCKE-JEEVE 搜索法,对内部天线的位置进行优化(实验假设边界天线是小区间的公共天线,位置不能变动)。

目标函数为基于系统高效性的天线效率:

$$\eta_{\text{efficiency}}^d = \frac{2R}{3d_a \sqrt{L}} \cdot \left(\frac{S_{\text{cell}}}{\pi R^2} \right)^2 \quad (9)$$

其中,

$$d_a = E(d) = \iint_{\text{all the points in cell}} d(x, y) \cdot f(x, y) dx dy = \sum_{\text{all the points in cell}} \frac{d}{200} = \sum_{i=1}^{200} \frac{d_i}{200}$$

限制条件为:不移动边界天线,且将天线间距限制在 $[0.2R, 0.8R]$ 。

目标函数初值为 78.12% ,程序流程图如图 5 所示。

优化结果:平均最小接入距离为 $0.1815R$,缩小

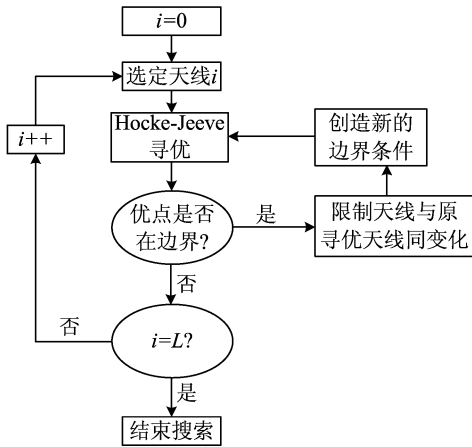


图 5 优化实验程序流程图

Fig. 5 The flow chart of the optimization experiment

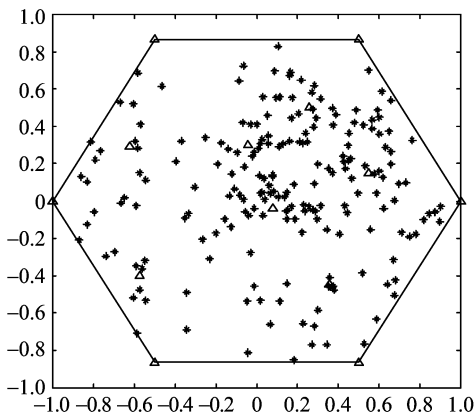


图 6 基于高效性最优的天线分布方式

Fig. 6 The optimal layout at based on efficiency

了约 6.75%，这将大大降低系统的总发射功率。天线效率为 83.68%，比原始目标函数值约提高了 6.75%；得到的优化天线分布结果如图 6 所示。

3 结论

本文分别提出了基于可靠性和高效性的天线效率，进而得到了基于两种不同的天线效率的天线优化方法或最优分布的结论。

天线数为自然数平方时，基于可靠性的天线最优分布方式为小区分裂式的天线分布；天线数为非

自然数平方时，可以通过“放射法”找到最优分布。对于传统六边形 DAS 小区的天线部署或是位置优化可以根据系统需要来选定可接受的最大最小接入距离，然后选择相应的最优天线数目和可靠性最优的天线部署位置。

基于高效性的天线分布方式是由具体的用户分布情况等因素来确定的。本文给出了一个实例，并通过仿真证明了优化后的 DAS 的天线高效性效率达到 83.68%，比优化前提高了 6.75%。但现实中的优化性能提高比例是和用户分布的不均匀程度成正比：用户分布越不均匀，优化效果越好。论文的研究结论为 DAS 的天线部署或是天线位置优化提供了一个重要可行的参考。

参考文献 (References)

- [1] Dai Lin. Distributed antenna system: Performance analysis in multi-user scenario [C]// Proceedings of 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems. IEEE, 2008:85-89.
- [2] Yang Lie-Liang. Performance of MMSE Multiuser Detection in Cellular DS-CDMA Systems Using Distributed Antennas [C]//Proceedings of IEEE 63rd Vehicular Technology Conference: vol 1. IEEE, 2006: 274-278.
- [3] Mo Yi-jun., Xie Juan, Huang Ben-Xiong. Handoff in Virtual Cell System based on Distributed Antenna [C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2006. IEEE, 2006:1-4.
- [4] Zhang Jun, Andrews JG. Cellular Communication with Randomly Placed Distributed Antennas [C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, 2007. IEEE, 2007:1 400-1 404.
- [5] Zhang Jun, Andrews J. Distributed Antenna Systems with Randomness [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9):3 636-3 646.
- [6] Zhuang Hai-ruo, Dai Lin, Xiao Liang, et al. Spectral efficiency of distributed antenna system with random antenna layout[J]. Electronics Letters, 2003, 39(6): 495-496.