

线形小区中基于定时捕获阶段的最优天线位置设计

卿朝进^{1,2}, 夏天², 张近¹, 夏凌¹

(1. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039; 2. 电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要:针对线形小区, 研究设计了基于定时捕获阶段的分布式天线的位置。首先, 利用互相关定时捕获方法建立捕获模型; 然后, 基于极小极大准则, 找出线形小区中移动台不同位置时定时捕获的最坏情况; 最后, 利用定时捕获最坏情况概率推导出每根分布式天线的最优位置。仿真研究表明: 当线形小区中移动台位置均匀分布时, 任意多根分布式天线的最优天线位置应基于线形小区的中心对称放置; 载波频率偏移对分布式天线的最优位置影响并不明显。

关键词:分布式天线; 定时捕获; 天线位置设计; 极小极大准则

中图分类号: TN914

文献标志码: A

Design of Optimal Antenna Location in Linear Cells Based on Timing Acquisition

QING Chao-jin^{1,2}, XIA Tian², ZHANG Jin¹, XIA Ling¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. National Key Lab of Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731 China)

Abstract: In linear cells, the optimal location design for distributed antennae is conducted based on timing acquisition. First, the model of timing acquisition is formulated by using the cross-correlation method. Then, the worst cases of timing acquisition with the different locations of mobile station are explored according to the minimax criterion. Finally, the optimal antenna location of each distributed antenna is derived with the the probability of the worst case. When the distribution of mobile station is uniform in the linear cells, the research results show that the distributed antennae should be located symmetrically. The research results also show that the effect of carrier frequency offset on the optimal antenna location is not obvious.

Key words: distributed antenna; timing acquisition; antenna location design; minimax criterion

相比于集中式天线系统和单天线系统, 分布式天线系统可获得更高的频谱效率^[1]。作为第4代无线通信系统的关键技术, 分布式天线技术引起了学者的研究兴趣, 是一项极具前瞻性的研究课题^[1-2]。

近年来, 分布式天线的位置设计是学者的研究热点之一^[3-5]。文献[4]研究了圆形小区内多根分

布式天线的位置设计。通过最小化区域平均误比特率, 文献[6]研究了线形小区中2根分布式天线的位置设计。文献[5]将天线位置设计推广到了一般分布式天线系统。文献[3-5]的方法均假设时间和频率已经同步, 定时捕获过程已经完成; 然而, 在通常情况下, 定时捕获处理过程应先于定时跟踪、信道估计等处理过程。若定时捕获过程尚未完

收稿日期: 2012-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(60832007、60901018、60902027、U1035002/L05、61001087); 国家863计划(2009AA01Z236); 国家重大科技专项(2009ZX03003-008-01); 国家科技支撑计划(2010ZX03003-002、2011ZX03001-006-01); 中央高校基金(ZYGX2009J010、ZYGX2009J008); 博士后科学基金面上资助项目(2012M511920); 教育部春晖计划(Z2011091); 四川省教育厅重点项目(12ZA161); 西华大学校重点项目(Z1120941)。

作者简介: 卿朝进(1978-), 男, 讲师, 博士, 电子科技大学博士后流动站博士后, 主要研究方向为无线与移动通信系统中的信号处理。E-mail: qingchj@uestc.edu.cn

成,系统未能同步,先前的天线位置设计方法^[4-6]将不再适用。

针对定时捕获阶段的研究,文献[7-8]设计了线形小区中2根分布式天线的位置。本文将文献[7-8]的天线数目推广到任意多根,且考虑频率偏移对天线位置设计的影响。文章首先利用互相关定时捕获方法^[7-8]建立捕获模型,然后基于极小极大准则^[9],找出线形小区中移动台不同位置时定时捕获的最坏情况,最后利用定时捕获最坏情况概率推导出每根分布式天线的最优位置。仿真研究表明:当线形小区中移动台位置均匀分布时,任意多根分布式天线的最优天线位置应基于线形小区的中心对称放置;同时,载波频率偏移对分布式天线的最优位置影响并不明显。

1 系统模型

本文的最优天线位置设计考虑的是线形小区场景,研究的系统模型如图1所示。在图1中, R 表示线形小区的大小, $a_i(1 \leq i \leq I)$ 表示分布式天线 RX_i 的位置,移动台(MS: mobile station)位于点 x 。

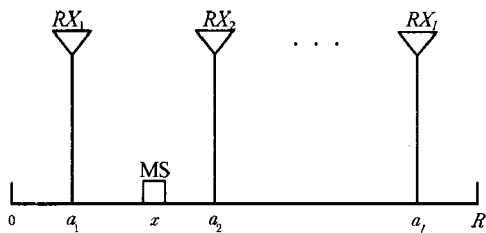


图1 系统模型

采用正交频分复用(OFDM: orthogonal frequency division multiplexing)调制方式,经快速傅里叶逆变换(IFFT: inverse fast fourier transform)后,MS 发出信号的基带形式为

$$x(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi nk/N}, -N_g \leq k \leq N-1 \quad (1)$$

式中: N 为FFT长度; X_n 为第 n 载波上发送的数据序列,其均值为零,方差为 $E\{|X_n|^2\} = \sigma_x^2$; N_g 为循环前缀长度,不失一般性,这里假设循环前缀长度大于最大多径时延。

这里,信道模型考虑了大尺度衰落和小尺度衰落^[10]。根据文献[11],MS 与 RX_i 之间的信道衰落系数可表示为

$$g_i = \sqrt{\frac{cs_i}{D_i^\alpha}} H_i, 1 \leq i \leq I \quad (2)$$

式中: c 为路径损耗均值的中值,是一常数; s_i 表示大尺度阴影衰落,服从对数正态分布; α 为大尺度路径损耗指数;MS 与 RX_i 之间的有效距离为 D_i ,有

$$D_i = \max\{d_0, d_i\} \quad (3)$$

其中, d_i 为MS 与 RX_i 之间的距离, d_0 是 d_i 最小允许值。在式(2)中,多径衰落系数 H_i 可表示为

$$H_i = [h_i(0), h_i(1), \dots, h_i(l_i), \dots, h_i(L_i - 1)] \quad (4)$$

这里, $h_i(l_i)$ 为第 l_i 个信道抽头, L_i 表示最大多径时延对应的信道抽头号。

在分布式天线 RX_i 处,接收信号为

$$r_i(k) = e^{j2\pi\nu_i k/N} y_i(k) + w_i(k) \quad (5)$$

式中: ν_i 为归一化载波频率偏移; $y_i(k)$ 可表示为

$$y_i(k) = \sum_{l_i=0}^{L_i-1} \sqrt{\frac{cs_i}{D_i^\alpha}} h_i(l_i) x(k - l_i - \tau_i) \quad (6)$$

其中, τ_i 为定时偏移, $w_i(k)$ 为复高斯白噪声,其均值为0,方差为 $\sigma_{w_i}^2$ 。

2 定时捕获

与文献[7]和[8]类似,这里的定时捕获采用互相关方法,即互相关运算为

$$C_i(m) = \sum_{k=0}^{N-1} r_i(k+m) s^*(k) = P_i(m) + W_i(m), m \in [0, U-N] \quad (7)$$

其中

$$P_i(m) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi\nu_i k/N} y_i(k+m) s^*(k) \quad (8)$$

$$W_i(m) = \sum_{k=0}^{N-1} w_i(k+m) s^*(k) \quad (9)$$

取 U 为观测窗口长度, $W_i(m)$ 是均值为0,方差为 $N\sigma_{w_i}^2$ 的高斯白噪声。根据文献[12],时间偏移估计为

$$\hat{\tau}_i = \arg \max_m \{|C_i(m)|\} \quad (10)$$

3 基于极小极大准则的天线位置设计

考虑风险函数 $R(\theta, \delta)$,如果估计子 $\delta^M: X \rightarrow \Theta$ 在所有的估计子当中,使得风险函数最小化,即满足^[9]

$$\sup_{\theta \in \Theta} R(\theta, \delta^M) = \inf_{\delta} \sup_{\theta \in \Theta} R(\theta, \delta) \quad (11)$$

这里,称 $\delta^M: X \rightarrow \Theta$ 为极小极大估计子^[9]。极小极大估计子要求估计子在最坏情况下达到最好性能。

假设 θ 的先验分布为 π ,在 θ 最不利条件下,极小极大估计子 δ_π 为贝叶斯估计子,从而, δ_π 的平均

风险函数可表示为

$$r_{\pi} = \int R(\theta, \delta_{\pi}) \, d\pi(\theta) \tag{12}$$

对于任何一种分布 π' (平均风险函数 $r_{\pi'}$), 恒有 $r_{\pi} \geq r_{\pi'}$, 称先验分布 π 为最不利分布。

这里, 将分布式天线的位置设计与优化模型化为极小极大估计问题。也就是说, 针对 MS 位置未知的情况, 在定时捕获阶段进行天线位置设计应最小化天线位置设计风险函数的最大值。

假设没有信道路径的采样点处的互相关值为 $P_i(m_{NC})$, 根据文献[12], $P_i(m_{NC})$ 的大小可以忽略不计。由式(7), 有 $C_i(m_{NC}) \approx P_i(m_{NC})$, 从而, $|C_i(m_{NC})|$ 服从瑞利分布。假设恒虚警概率为 P_{FA} (常数), 根据文献[13], RX_i 的检测门限 γ_i 为

$$\gamma_i = \sqrt{-2N\sigma_{iw}^2 \ln P_{FA}} \tag{13}$$

假设定时捕获的正确检测概率为 P_{Di} , 根据式(13)和式(10), P_{Di} 可表示为

$$P_{Di} = P\{|C_i(\hat{\tau}_i)| > \gamma_i, -N_g + L_i \leq \hat{\tau}_{ic} \leq 0\} = P\{|C_i(\hat{\tau}_i)| > \gamma_i\} \cdot P\{-N_g + L_i \leq \hat{\tau}_{ic} \leq 0\} \tag{14}$$

假设 P_N 表示没有任何一根分布式天线正确检测到来自 MS 的信号的概率, 有

$$P_N = \prod_{i=1}^I (1 - P_{Di}(|x - a_i|)) \tag{15}$$

由式(15)可知, 最坏情况发生在 P_N 为最大值时。假设最坏情况发生的概率为 P_{wC} , 有

$$P_{wC} = \max_x \{p(x) P_N\}, x \in [0, R] \tag{16}$$

其中, $p(x)$ 表示 MS 所处位置的概率密度函数。于是, 最优的天线位置设计可通过最小化 P_{wC} 得到, 即分布式天线 RX_i 的位置为

$$\hat{a}_i = \arg \min_{a_i} P_{wC} \tag{17}$$

将式(16)代入式(17), 有

$$\hat{a}_i = \arg \min_{a_i} \{ \max_x \{p(x) P_N\} \} \tag{18}$$

通常情况下, MS 的位置是随机的。不失一般性, 可假设 MS 在线形小区中的位置服从均匀分布。于是, 式(18)中的概率密度函数 $p(x)$ 为常数。式(18)等价于

$$\hat{a}_i = \arg \min_{a_i} \{ \max_x \{P_N\} \} \tag{19}$$

4 数值仿真结果

仿真参数如表 1 所示。假设接收机平均接收信噪比为 SNR , 根据文献[14], SNR 的中值 ρ 可表示为

$$\rho = c\sigma_s^2 / (D^\alpha \sigma_w^2) \tag{20}$$

其中, $D = R/2$, 即小区长度的一半。

表 1 仿真参数

参数描述	数值
载波频率/GHz	2
采样频率/MHz	1.5
MS 移动速度/(km/h)	120
阴影衰落标准差/dB	8
路径损耗指数	3.7
c(参考距离 100 m)/dB	$c \cdot 100^{-3.7} = -78^{[11]}$
多径信道模型	Vehicular - A 模型 ^[15]
FFT 长度 N	128
CP 长度 N_g	16
训练序列	Chu 序列 ^[16]
线形小区长度/m	1000
最小有效距离/m	20
噪声功率/dBm	-100
恒虚警概率	1×10^{-6}

表 2 列出了分布式天线数目为 3 根和 4 根时的最优天线位置。

表 2 分布式天线的最优位置

天线数目	I = 3	I = 4
最优天线位置/m	$a_1 = 90$ $a_2 = 500$ $a_3 = 910$	$a_1 = 50$ $a_2 = 330$ $a_3 = 670$ $a_4 = 950$

根据表 2 可知, 最优天线位置对称分布在小区中心两侧。

对于不同载波频率偏移, 图 2 和图 3 分别给出了分布式天线的根数为 3 和 4 条件下的概率 P_N 与 MS 位置之间的变化曲线。其中, ρ 为 5 dB, 载波频率偏移值取 $[0, 0.5, 5.6]$, 分布式天线位置按照表 2 给定。

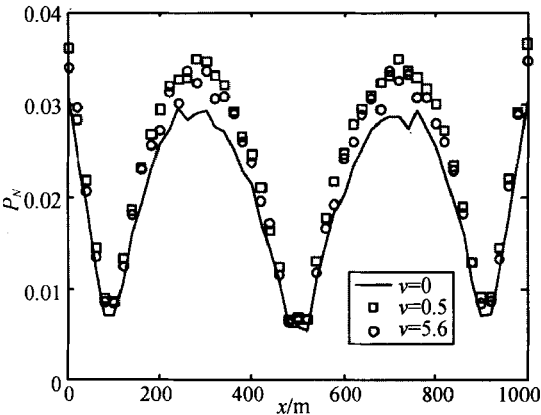


图 2 3 根分布式天线时, P_N 的变化曲线

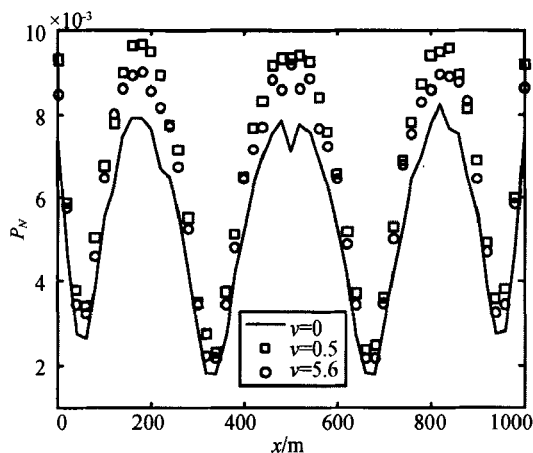


图3 4根分布式天线时, P_N 的变化曲线

由图2和图3的结果表明,针对本文提出的方法,载波频率偏移对天线位置设计的影响并不明显。

5 结论

本文研究了线形小区中多根分布式天线的最优位置设计。不同于现有方法,本文提出的天线位置设计方法是针对 OFDM 定时捕获阶段的。仿真研究结果表明:当线形小区中移动台位置均匀分布时,任意多根分布式天线的最优天线位置应基于线形小区的中心对称放置;同时,载波频率偏移对分布式天线的最优位置影响并不明显。

参考文献

- [1] Castanheira D, Gameiro A. Distributed Antenna System Capacity Scaling[J]. IEEE Wireless Commun., 2010, 17(3): 68-75.
- [2] You X H, Wang D M, Sheng B, et al. Cooperative Distributed Antenna Systems for Mobile Communications[J]. IEEE Wireless Commun., 2010, 17(3): 35-43.
- [3] Zhang J, Andrews J. Distributed Antenna Systems with Randomness[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2008, 7(9): 3636-3646.
- [4] Han L, Tang Y X, Shao S H, et al. On the Design of Antenna Location for OSTBC with Distributed Transmit Antennas in a Circular Cell [C]//IEEE International Conference on Communications (ICC'2010). Cape Town: IEEE, 2010: 1-5.

Cape Town: IEEE, 2010: 1-5.

- [5] Wang X Z, Zhu P C, Ming Chen. Antenna Location Design for Generalized Distributed Antenna Systems[J]. IEEE Commun. Lett., 2009, 13(5): 315-317.

- [6] Shen Y, Tang Y X, Kong T, et al. Optimal Antenna Location for STBC-OFDM Downlink with Distributed Transmit Antennas in Linear Cells[J]. IEEE Commun. Lett., 2007, 11(5): 387-389.

- [7] 卿朝进, 夏天, 唐友喜, 等. 基于 OFDM 定时捕获的分布式天线位置设计[J]. 电子技术应用, 2011, 37(5): 118-120.

- [8] Xia T, Chaojin Qing, Shao S H, et al. Antenna Location Design for Distributed Antenna Systems Based on Timing Acquisition[C]//the 6th International ICST Wireless Internet Conference (WICON'2011), Xian: Springer, 2011: 73-81.

- [9] Verdu S, Poor H. On Minimax Robustness: A General Approach and Applications[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1984, 30(2): 328-340.

- [10] Rappaport T S. Wireless Communications: Principles and Practice[M]. 2nd ed. New York: Addison Wesley/Pearson, 2004: 105-255.

- [11] Qian Y Z, Chen M, Wang X Z, et al. Antenna Location Design for Distributed Antenna Systems with Selective Transmission[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP 2009). Nanjing: WCSP, 2009: 1-5.

- [12] Awoseyila A B, Kasparis C, Evans B G. Robust Time-domain Timing and Frequency Synchronization for OFDM Systems[J]. IEEE Trans. Consum. Electron., 2009, 55(2): 391-399.

- [13] Kay S M. Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998: 501-526.

- [14] Catreux S, Driessen P F, Greenstein L J. Data Throughputs using Multiple-input Multiple-output (MIMO) Techniques in a Noise-limited Cellular Environment[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2002, 1(2): 226-235.

- [15] ITU-R M. 1225. Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000[M]. [S.l.]: [s.n.], 1997: 28.

- [16] Chu D. Polyphase Codes with Good Periodic Correlation Properties[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1972, 18(4): 531-532.

(编校: 饶莉)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>