

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.021

线形小区中分布式天线协同的定时捕获改进方法^{*}

卿朝进^{1,2,3,**}, 夏凌¹, 张近¹, 何子述², 唐友喜³

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

摘 要:不精确的定时捕获造成分布式天线系统性能的严重下降, 现有的改善分布式天线系统定时捕获性能的方法存在诸多不足。为进一步提高分布式天线系统定时捕获时的正确捕获概率, 提出了一种基于分布式天线协同的定时捕获方法。该方法针对线形小区的平坦瑞利衰落信道场景, 利用两根分布式接收天线接收来自单天线移动台的发射信号; 随后, 推导了两分布式接收天线的时延差先验信息, 建立了协同定时捕获的协同条件; 最后, 根据门限检测方法在协同条件下进行定时捕获。分析与仿真结果表明, 在定时捕获时, 无论移动台处于协同区域的哪个位置, 提出方法均能有效改善各分布式接收天线的正确捕获概率。

关键词:分布式天线; 定时捕获; 协同处理; 检测门限; 线形小区

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)06-0777-05

An Improved Timing Acquisition Method with Cooperation of Distributed Antennas in Linear Cell

QING Chao-jin^{1,2,3}, XIA Ling¹, ZHANG jin¹, HE Zi-shu², TANG You-xi³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3. National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The inaccuracies of timing acquisition significantly degrade the performance of distributed antenna systems (DAS). In the existing methods, there are many insufficiencies to improve the timing acquisition performance. To accommodate and compensate these insufficiencies, a timing acquisition method with the cooperation of distributed receive antennas is proposed. In the flat Rayleigh channels of linear cell, two distributed receive antennas are adopted to receive the signal transmitted from the mobile station (MS) with a single antenna. Then, a precondition of cooperation is exploited by utilizing the prior information of the time-delays difference from the two distributed receive antennas. With the exploited cooperation precondition, the timing acquisition based on the method of threshold detection is performed at each distributed antenna. Analysis and simulations show that the probability of correct acquisition for each distributed antenna can be improved according to the proposed method wherever the MS is located.

Key words: distributed antenna; timing acquisition; cooperation processing; detection threshold; linear cell

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-04-12 Received date: 2013-01-05; Revised date: 2013-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60901018, 60902027, U1035002/L05, 61001087); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2009AA01Z236); 国家科技重大专项 (2009ZX03003-008-01); 国家科技支撑计划 (2010ZX03003-002, 2011ZX03001-006-01); 中央高校基金资助项目 (ZYGX2009J010, ZYGX2009J008); 中国博士后科学基金面上资助项目 (2012M511920); 教育部春晖计划项目 (Z2011091); 四川省教育厅重点项目 (12ZA161); 西华大学校重点项目 (Z1120941)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 60901018, 60902027, U1035002/L05, 61001087); The National High-tech R&D Program of China (863 Program) (2009AA01Z236); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology (2009ZX03003-008-01); The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology (2010ZX03003-002, 2011ZX03001-006-01); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2009J010, ZYGX2009J008); The China Postdoctoral Science Foundation (2012M511920); The Chunhui Plan of Ministry of Education (Z2011091); The Research Foundation of Education Bureau of Sichuan Province (12ZA161); The Key Projects of Xihua University (Z1120941)

^{**} 通讯作者: qingchj@uestc.edu.cn Corresponding author: qingchj@uestc.edu.cn

1 引言

相对于集中式天线系统,分布式天线系统拥有诸多优点,如增加通信系统容量、节省通信系统的发射功率和降低系统的中断概率等^[1-2]。作为第四代无线通信系统的关键技术,分布式天线系统成为近年来世界范围内的研究热点^[3-4]。

与此同时,定时捕获错误造成通信系统性能的严重下降^[5-7],改善分布式天线系统的定时捕获性能是一直以来的研究热点^[8-13]。然而,在现有的文献中,文献[8-10]还没有将分布式接收天线间的协同处理应用到分布式天线系统的定时捕获中。文献[11-13]作了尝试性研究,将分布式接收天线间的协同处理应用于分布式天线系统的定时捕获。针对存在直视路径的信道场景,文献[11]提出天线位置信息辅助的协同定时捕获方法:在定时捕获时,利用各天线位置信息建立协同处理的协同条件,推导出发射信号传输时延的最大似然估计。文献[12]针对平坦瑞利衰落信道,利用各分布式天线的覆盖能力信息建立协同定时捕获的协同处理条件,并推导出发射信号到达各分布式接收天线的传输时延的协同最大似然估计。文献[13]将协同定时捕获引入到基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制的分布式天线系统中,在不增加各分布式接收天线的虚警概率的条件下,构建出系统所需的协同检测门限。

虽然文献[11-13]提出的协同处理方法在一定程度上改善了分布式天线系统的定时捕获性能,但这些方法仍存在不足。文献[11]和[12]均假设“移动台(Mobile Station, MS)发射信号始终存在”,从而在定时捕获时可不利用检测门限对发射信号的存在性进行判断。文献[11]和[12]算法的前提过于理想,不适合工程应用。虽然文献[13]考虑门限检测,对基于 OFDM 调制的分布式天线系统进行定时捕获,然而需要预设期望的检测概率,算法的实效性受限。

针对文献[11-13]的不足,本文作改进性研究。不同于文献[11]和[12]的方法,本文提出的方法基于门限检测,弥补了文献[11]和[12]的不足。同时,有别于文献[13]的定时捕获方法,本文提出的方法无需预设期望的检测概率,可提高文献[13]方法的实效性。为简化研究,本文研究场景假设为两根分布式接收天线接收来自线形小区^[14]平坦瑞利信道的单天线 MS 的信号。提出方法首先根据 MS 发射信号到达两分布式接收天线 DRX₁ 和 DRX₂ 的时延差先验信息,建立协同定时捕获的协同条件;随后,

推导出天线定时捕获所需的检测门限;最后,根据门限检测方法在协同条件下进行定时捕获。分析与仿真结果表明,在定时捕获时,无论移动台处于协同区域的哪个位置,提出方法均能有效提高各分布式接收天线的正确捕获概率。

2 系统模型

系统模型如图 1 所示,两分布式天线 DRX₁ 和 DRX₂ 的位置分别为 0 和 R,高度分别为 $h_{RX,1}$ 和 $h_{RX,2}$,MS 的高度为 h_{MS} 。DRX₁ 和 DRX₂ 共同完成线形小区区间 $[0, R]$ 上 MS 的定时捕获。

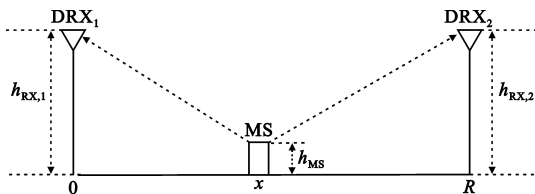


图 1 系统模型
Fig.1 System model

用 $g(t)$ 表示持续时间为 T 、中心在 $T/2$ 的单位矩形脉冲函数;用 $c(t) = \sum_{j=0}^{L-1} c_j g(t - jT_c)$ 表示训练脉冲串,其中 $\{c_j\}$ 表示长度为 L 的训练序列;MS 发射的基带信号为 $s(t)$ 。DRX₁ 和 DRX₂ 接收信号可表示为

$$\begin{cases} r_1(t) = \sqrt{\xi_1} h_1 s(t - \tau_1 T) + n_1(t) \\ r_2(t) = \sqrt{\xi_2} h_2 s(t - \tau_2 T) + n_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\sqrt{\xi_i}$ ($i = 1, 2$) 为平均路径损耗和对数阴影衰落影响的功率增益因子^[15], h_i ($i = 1, 2$) 为小尺度衰落信道系数^[15], 这里模型化为零均值、单位方差的复高斯随机变量; $\tau_1 T$ 和 $\tau_2 T$ 分别为 MS 的发射信号到 DRX₁ 和 DRX₂ 的传播时延, τ_i ($i = 1, 2$) 是按照周期 T 进行归一化处理后的时间延迟, 是本文的待估计参量, 不失一般性, 取 $0 < \tau_i \leq L - 1$; $n_1(t)$ 和 $n_2(t)$ 为零均值的复高斯白噪声, 噪声功率为 σ_i^2 。

3 定时捕获方法

3.1 协同先验信息

根据系统模型描述,MS 的发射信号在协同区域内能被分布式天线 DRX₁ 和 DRX₂ 共同感知。在进行天线摆放时,协同区域可根据天线的覆盖能力确定;在非自由空间场景中,该区域通常为图 1 中的 $[0, R]$ 上的一部分。为节省开销,协同区域通常不

包括 DRX_1 和 DRX_2 所在的位置。从而,在假设 v 为光速时,有

$$0 \leq \tau_i T \leq \frac{R}{v}, i = 1, 2 \quad (2)$$

也即是 $|\tau_1 T - \tau_2 T| \leq R/v$, 取 $\tau_0 T = R/v$, 于是 $\tau_1 T$ 和 $\tau_2 T$ 间的差值为 $|\tau_1 T - \tau_2 T| \leq \tau_0 T$, 即

$$|\tau_1 - \tau_2| \leq \tau_0 \quad (3)$$

假设搜索步长为 T , 于是有 $\tau_0 = \lceil R/(vT) \rceil$, 其中 $\lceil X \rceil$ 表示对 X 作向上取整运算。

3.2 定时捕获检测门限

在传统的定时捕获方法^[16]基础上, DRX_1 和 DRX_2 处的定时捕获首先利用基于门限检测的互相关方法进行处理。接收信号与已知训练序列的互相关运算为

$$C_i(\tau_i) = \int_0^{T_0} r_i^*(t) s(t - \tau_i T) dt, i = 1, 2 \quad (4)$$

其中, T_0 为观察间隔。不失一般性, $T_0 = LT$, 从而 DRX_1 和 DRX_2 可以观测到整个的训练序列。

假设 $\tau_i (i = 1, 2)$ 的估计量为 $\hat{\tau}_i$, 根据基于门限检测的捕获方法^[16], 有

$$\hat{\tau}_i = \arg \max_{\tau_i} \{ |C_i(\tau_i)|^2 \}, i = 1, 2 \quad (5)$$

其中, $0 < \tau_i \leq L - 1$, $T_{h,i}$ 表示 DRX_i 处的检测门限。若不等式 $|C_i(\hat{\tau}_i)|^2 \geq T_{h,i}$ 成立, 则 DRX_i 通过门限检测, $\hat{\tau}_i$ 即为 DRX_i 时延的估计量; 否则, DRX_i 漏检或 MS 没有发射信号。

当没有 MS 发射信号存在时, 根据文献^[17]知, $|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|$ 服从瑞利分布, 其概率密度函数为

$$p_R(|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|) = \frac{|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|}{L\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2}{2L\sigma_i^2}\right) \quad (6)$$

其中, $|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|$ 表示没有 MS 发射信号存在时, 在延迟 $\tau_{i,\text{NS}}$ 处互相关运算的模。因此, $|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2$ 可模型化为自由度为 2 的 χ^2 分布, 其概率密度函数为^[18]

$$p_R(|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2) = \frac{1}{2L\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2}{2L\sigma_i^2}\right) \quad (7)$$

从而, 虚警概率 P_{FA} 为

$$P_{\text{FA}} = p_{\text{rob}}(|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2 > T_{h,i}) = 1 - \int_0^{T_{h,i}} p_R(|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2) d[p_R(|C_i(\tau_{i,\text{NS}})|^2)] = \exp\left(-\frac{T_{h,i}}{2L\sigma_i^2}\right) \quad (8)$$

于是, 根据给定的预定虚警概率 P_{FA} , 可得到检测门限 $T_{h,i}$ 为

$$T_{h,i} = -2L\sigma_i^2 \ln(P_{\text{FA}}) \quad (9)$$

其中, σ_i 可由无 MS 发射信号存在时估计得到。

3.3 天线协同的定时捕获

式(5)所述的定时捕获还没有考虑 DRX_1 和 DRX_2 间的协同处理。这里, 利用式(3)作为协同条件, 在进行定时捕获时, 实现 DRX_1 和 DRX_2 的协同处理, 从而去除在 MS 发射信号存在的情况下定时捕获的一部分错误, 提高正确捕获概率。

在进行定时捕获时, DRX_1 和 DRX_2 协同处理的算法如下。

Step1: DRX_1 和 DRX_2 分别进行定时捕获预估, 即根据式(5)获取估计量 $\hat{\tau}_i, i = 1, 2$ 。

Step2: 判断各天线是否能通过门限检测, 即判断不等式 $|C_1(\hat{\tau}_1)|^2 \geq T_{h,1}$ 和 $|C_2(\hat{\tau}_2)|^2 \geq T_{h,2}$ 是否成立。若不等式 $|C_1(\hat{\tau}_1)|^2 \geq T_{h,1}$ 和 $|C_2(\hat{\tau}_2)|^2 \geq T_{h,2}$ 中存在不等式不成立, 则 DRX_1 和 DRX_2 可能有天线漏检或 MS 没有发射信号, 若 $\exists |C_i(\hat{\tau}_i)|^2 \geq T_{h,i}$, 则 $\hat{\tau}_i$ (根据式(5)得到) 为 DRX_i 最终时延估计量, 也即是

$$\begin{cases} \hat{\tau}_i = \arg \max_{\tau_i \in [0, L-1]} \{ |C_i(\tau_i)|^2 \} \\ \text{s.t. } |C_i(\hat{\tau}_i)|^2 \geq T_{h,i} \end{cases} \quad (10)$$

随后, 结束此次定时捕获处理流程, 即转入 Step7; 否则, 转入 Step3。

Step3: 判断定时捕获时 DRX_1 和 DRX_2 的协同条件 $|\hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_2| \leq \tau_0$ 是否成立。若成立, 式(5)所述的 $\hat{\tau}_1$ 和 $\hat{\tau}_2$ 分别为 DRX_1 和 DRX_2 最终时延估计量, 即

$$\begin{cases} \hat{\tau}_1 = \arg \max_{\tau_1} \{ |C_1(\tau_1)|^2 \}, \tau_1 \in [0, L-1] \\ \hat{\tau}_2 = \arg \max_{\tau_2} \{ |C_2(\tau_2)|^2 \}, \tau_2 \in [0, L-1] \end{cases} \quad (11)$$

随后, 转入 Step7; 否则, 转入 Step4。

Step4: 式(5)得到的估计量 $\hat{\tau}_1$ 和 $\hat{\tau}_2$ 中必有错误 (其中之一错误或两个估计量均错), 需重新估计。取 l_1 和 l_2 的区间为

$$\begin{cases} l_1 \in [\max\{0, \hat{\tau}_2 - \tau_0\}, \min\{\hat{\tau}_2 + \tau_0, L-1\}] \\ l_2 \in [\max\{0, \hat{\tau}_1 - \tau_0\}, \min\{\hat{\tau}_1 + \tau_0, L-1\}] \end{cases} \quad (12)$$

假设新估计量为 $\hat{\tau}_{1,1}$ 和 $\hat{\tau}_{2,1}$, 则新估计量可表示为 $(\hat{\tau}_{1,1}, \hat{\tau}_{2,1})^T = \arg \max_{\substack{l_1, l_2 \\ |l_1 - l_2| \leq \tau_0}} \{ |C_1(l_1)|^2 + |C_2(l_2)|^2 \}$

(13)

若 $|C_1(\hat{\tau}_{1,1})|^2 \geq T_{h,1}$ 和 $|C_2(\hat{\tau}_{2,1})|^2 \geq T_{h,2}$ 均成立, 则 $\hat{\tau}_{1,1}$ 和 $\hat{\tau}_{2,1}$ (根据式(13)得到) 分别为 DRX_1 和 DRX_2 最终时延估计量, 随后转入 Step7; 否则, 转入 Step5。

Step5: 若 $|C_1(\hat{\tau}_{1,1})|^2 \geq T_{h,1}$ 且 $|C_2(\hat{\tau}_{2,1})|^2 \geq T_{h,2}$, 则取 $\hat{\tau}_{1,1}$ (根据 Step4 得到) 和 $\hat{\tau}_2$ (由式(5)得到) 分别

为 DRX_1 和 DRX_2 最终时延估计量。此时, DRX_1 和 DRX_2 最终时延估计量 $\hat{\tau}_{1,1}$ 和 $\hat{\tau}_2$ 可等效表示为

$$\begin{cases} \hat{\tau}_{1,1} = \arg \max_{l_1} |C_1(l_1)|^2, l_1 \in [\max\{0, \hat{\tau}_2 - \tau_0\}, \min\{\hat{\tau}_2 + \tau_0, L-1\}] \\ \hat{\tau}_2 = \arg \max_{\tau_2} |C_2(\tau_2)|^2, \tau_2 \in [0, L-1] \end{cases} \quad (14)$$

随后, 结束此次定时捕获处理流程, 即转入 Step7; 否则, 转入 Step6。

Step6: 有 $|C_1(\hat{\tau}_{1,1})|^2 < T_{h,1}$ 且 $|C_2(\hat{\tau}_{2,1})|^2 \geq T_{h,2}$, 取 $\hat{\tau}_1$ (根据式(5)得到) 和 $\hat{\tau}_{2,1}$ (根据 Step4 得到) 分别为 DRX_1 和 DRX_2 最终时延估计量。此时, DRX_1 和 DRX_2 最终时延估计量 $\hat{\tau}_1$ 和 $\hat{\tau}_{2,1}$ 可等效表示为

$$\begin{cases} \hat{\tau}_1 = \arg \max_{\tau_1} |C_1(\tau_1)|^2, \tau_1 \in [0, L-1] \\ \hat{\tau}_{2,1} = \arg \max_{\tau_2} |C_2(l_2)|^2, l_2 \in [\max\{0, \hat{\tau}_1 - \tau_0\}, \min\{\hat{\tau}_1 + \tau_0, L-1\}] \end{cases} \quad (15)$$

Step7: 结束本次定时捕获处理流程, 等待下一次定时捕获处理。

根据算法步骤 Step1 至 Step7, 分布式天线 DRX_1 和 DRX_2 便可完成对 MS 信号的协同定时捕获。

4 数值仿真

为验证提出方法的有效性, 本小节对提出方法进行仿真验证。仿真中, DRX_1 和 DRX_2 间的距离 $R = 500$ m, 训练序列为 Zadoff-Chu 序列^[19], 训练序列长度 $L = 1\,024$, $T = 1/1.5 \mu s$; 假设 DRX_1 和 DRX_2 的高度 $h_{RX,1}$ 和 $h_{RX,2}$ 相同, 取为 $h_{RX,1} = h_{RX,2} = 6$ m。MS 的高度为 $h_{MS} = 1$ m; 虚警概率 $P_{FA} = 10^{-6}$, DRX_1 和 DRX_2 噪声功率相当, 即 $\sigma_1^2 \approx \sigma_2^2$, 检测门限 $T_{h,i}$ 根据式(9)确定。

仿真中, 取大尺度衰落模型为文献[20]所述路径损耗与阴影衰落合并模型, 即

$$\left(\frac{P_{r,i}}{P_t} \right)_{dB} = 10 \lg K - 10 \gamma \lg \left(\frac{d_i}{d_0} \right) - \varphi_{dB}, i = 1, 2 \quad (16)$$

其中, γ 为路径损耗因子; d_0 为参考距离; MS 到 DRX_i 的距离为 d_i , 有 $d_1 = \sqrt{(h_{RX,1} - h_{MS})^2 + x^2}$, $d_2 = \sqrt{(h_{RX,2} - h_{MS})^2 + (R - x)^2}$; φ_{dB} 为零均值的高斯随机变量, $K = (\lambda/4\pi d_0)^2$, 其中, λ 为载波波长; $P_{r,i}$ 为 DRX_i 的接收功率, MS 的发射功率为 P_t 。根据文献[20], 考虑 2 GHz 载波频率的郊区场景, 可取 $\gamma = 3$, $d_0 = 1$ m, φ_{dB} 的标准差为 $\sigma_{\varphi_{dB}} = 3.7$; $\lambda = 0.15$ m (波长)。 DRX_1 和 DRX_2 的噪声功率为 -100 dBm。

假设 MS 的发射功率 P_t 保持不变 (也即是无论 MS 处于线形小区 $[0, R]$ 上的什么位置, MS 均以相

同的功率发射信号), 图 2 和图 3 分别给出了 $P_t = -30$ dBm 和 $P_t = -20$ dBm 时 DRX_1 和 DRX_2 的正确捕获概率与 MS 位置的关系曲线。从图 2 和图 3 可以看出, 相对于不进行协同处理, DRX_1 和 DRX_2 的协同处理使得 DRX_1 和 DRX_2 的正确捕获概率均得以改善。

当 MS 的位置为 $x = 0$ 时, MS 距离 DRX_1 近而距离 DRX_2 远, DRX_1 的接收信噪比通常较高而 DRX_2 的接收信噪比通常较低。从图 2 和图 3 可以看出, 定时捕获并没有因为 DRX_2 的协同引入而降低 DRX_1 正确捕获概率 (DRX_1 正确捕获概率保持在约 100%)。类似的情形也发生在 $x = R$ 时。因此, 提出算法具有健壮性。

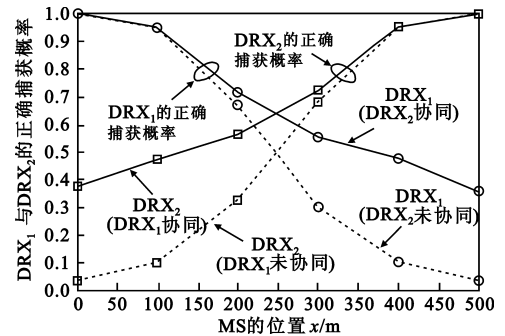


图 2 正确捕获概率随 MS 位置的变化曲线 ($P_t = -30$ dBm)
Fig. 2 The probability of correct acquisition versus MS location x when $P_t = -30$ dBm

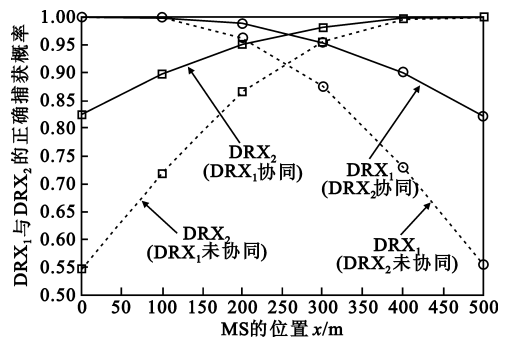


图 3 正确捕获概率随 MS 位置的变化曲线 ($P_t = -20$ dBm)
Fig. 3 The probability of correct acquisition versus MS location x when $P_t = -20$ dBm

5 结束语

针对现有的改善分布式天线系统定时捕获性能的方法的不足, 提出了一种基于分布式天线协同的定时捕获方法。该方法针对线形小区平坦瑞利信道场景, 根据两分布式接收天线的时延差先验信息, 建立协同定时捕获的协同条件, 随后根据门限检测方法在协同条件下进行定时捕获。分析与仿真结果表

明,在定时捕获时,无论移动台处于协同区域的哪个位置,提出方法均能有效改善各分布式接收天线的正确捕获概率。研究结果对分布式天线系统的设计与应用具有理论指导意义。同时,更为复杂的多径瑞利信道场景有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Park J, Song E, Sung W. Capacity analysis for distributed antenna systems using cooperative transmission schemes in fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(2): 586 – 592.
- [2] Dohler M, Aghvami H. Information outage probability of distributed STBCs over Nakagami fading channels[J]. IEEE Communication Letters, 2004, 8(7): 437 – 439.
- [3] Wang J Z, Zhu H L, Gomes N J. Distributed antenna systems for mobile communications in high speed trains[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 2012, 30(4): 675 – 683.
- [4] Park E S, Lee S R, Lee I. Antenna placement optimization for distributed antenna systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2012, 11(7): 2468 – 2477.
- [5] Vitthaladevuni P K, Alouini M S. Effects of imperfect phase and timing synchronization on the bit-error rate performance of PSK modulations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(7): 1096 – 1099.
- [6] Mostofi Y, Cox D C. Mathematical analysis of the impact of timing synchronization errors on the performance of an OFDM system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(2): 226 – 230.
- [7] Muhammad H O R, Majumder S P. Effect of timing synchronization error on the bit error rate performance of an OFDM system[C]//Proceedings of 2007 IEEE Information and Communication Technology. Dhaka: IEEE, 2007: 227 – 230.
- [8] Feng C, Zhang J, Zhang Y, et al. A novel timing synchronization method for MIMO OFDM systems[C]//Proceedings of 2008 IEEE Vehicular Technology Conference. Singapore: IEEE, 2008: 1443 – 1447.
- [9] Liu G, Ge J, Guo Y. Time and frequency offset estimation for distributed multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing systems[J]. IET Communications, 2010, 4(6): 708 – 715.
- [10] Zhang Y Y, Zhang J H, Sun F F, et al. A novel timing synchronization method for distributed MIMO-OFDM systems in multi-path Rayleigh fading channels[C]//Proceedings of 2008 IEEE Vehicular Technology Conference. Singapore: IEEE, 2008: 1443 – 1447.
- [11] Qing Chaojin, Shao Shihai, Tang Youxi. Timing acquisition for distributed antenna systems by exploiting the advantages of cooperation over flat-fading channels[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(2): 337 – 342.
- [12] Qing Chaojin, Shao Shihai, Tang Youxi. Timing acquisition for distributed antenna systems with the cooperation of two remote antennas[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(3): 527 – 532.
- [13] Qing Chaojin, Shao Shihai, Zhang Mintao, et al. Cooperative coarse timing synchronization for OFDM-based distribut-

ed antenna systems[C]//Proceedings of the 6th International ICST Wireless Internet Conference. Xi'an: IEEE, 2011: 373 – 380.

- [14] 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 Communication Letters, 2007, 11(5): 387 – 389.
- [15] Rappaport T S. Wireless communications: principles and practice[M]. 2nd ed. New York: Addison Wesley/Pearson, 2004: 105 – 248.
- [16] Pickholiz R, Schilling D, Milstein L. Theory of spread-spectrum communications-A tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(5): 855 – 884.
- [17] Awoseyila A B, Kasparis C, Evans B G. Robust time-domain timing and frequency synchronization for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronic, 2009, 55(2): 391 – 399.
- [18] Proakis J G. Digital Communications[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [19] Chu D C. Polyphase codes with good periodic correlation properties[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(4): 531 – 532.
- [20] Goldsmith A. Wireless Communications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.

作者简介:



卿朝进(1978—),男,四川安岳人,2006年和2011年分别获硕士和博士学位,主要研究方向为无线与移动通信系统中的同步与信号检测技术;

QING Chao-jin was born in Anyue, Sichuan Province, in 1978. He received the M.S. degree and the Ph.D. degree in 2006 and 2011, respectively. His research concerns detection and syn-

chronization in wireless mobile communication systems.

Email: qingchj@uestc.edu.cn

夏凌(1962—),女,四川成都人,1990年和2009年分别获硕士和博士学位,主要研究方向为信号与信息处理;

XIA Ling was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1962. She received the M.S. degree and the Ph.D. degree in 1990 and 2009, respectively. Her research concerns signal and information processing.

Email: 13618065236@139.com

何子述(1962—),男,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为通信侦查、MIMO雷达理论;

HE Zi-shu was born in 1962. He is now a professor with the Ph.D. degree and also the Ph.D. supervisor. His research concerns communication detection and MIMO radar theory.

Email: zshe@uestc.edu.cn

唐友喜(1964—),男,1993年和1997年分别获硕士学位和博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为无线与移动通信中的信号处理。

TANG You-xi was born in 1964. He received the M.S. degree and the Ph.D. degree in 1993 and 1997, respectively. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research concerns wireless mobile systems with emphasis on signal processing in communications.

Email: tangyx@uestc.edu.cn