

OFDM 超分辨率联合 TOA/AOA 定位

陈奎, 徐钊

CHEN Kuirs, XU Zhao

中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008

School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China

CHEN Kuirs, XU Zhao. Joint TOA/AOA positioning algorithm for OFDM. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(17): 145-147.

Abstract: The accuracy of prediction of time of arrival (TOA) and angle of arrival (AOA) in wireless indoor positioning is the most important parameter for indoor positioning systems. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is an efficient technique for high-speed digital transmission over multipath fading channels. In this paper, a joint TOA/AOA super-resolution algorithm for OFDM positioning is proposed. Using the obtained channel frequency response (CFR) and the frequency domain received signal on each antenna, a MUSIC super-resolution algorithm is used to recover the time delay and angle of signal arrivals from a mobile device to a base station and/or an access point. Then, the estimated TOA and DOA of the first arrival path (FAP) are used in a proposed hybrid time/direction of arrival position location scheme. In simulations, the OFDM signal with pilot symbols transmission in a multipath fading channel is considered to illustrate the efficiency of the proposed algorithms. Results show that the positioning precision is high enough for actual application, especially in the environment with only one access point and base station.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Time Of Arrival (TOA); Direction of Arrival/Angle of Arrival (DOA/AOA); super-resolution; MUSIC algorithm

摘要: 对无线信号到达时间 (TOA) 和到达角度 (AOA) 的精确估计是室内无线定位的关键。正交频分复用 (OFDM) 是适合多径衰落环境的一种高速传输技术。提出一种联合 TOA 和 DOA 的二维定位方法用于 OFDM 信号定位。算法首先通过信道估计得到信道的频率响应 (CFR), 对 CFR 采用超分辨率算法估计信道时延。首径 (first arrival path, FAP) 的时延估计就是接收信号的 TOA 估计。将天线阵列接收信号通过 DFT 变换到频域, 利用同样的算法估计信号各径的 AOA/DOA。最后联合 TOA 和 AOA 在二维平面上确定目标位置。由于信号是多径、多载波信号, 对各载波的 DOA/AOA 估计在载波间进行处理, 再结合各径脉冲响应的幅值, 选出属于首径的 DOA/AOA 估计。在多径环境下仿真表明算法有效且定位精度能够满足实际需要, 尤其适合环境中只有一个基站或接入点的情况。

关键词: 正交频分复用 (OFDM); 到达时间 (TOA); 信号到达方向/到达角度; 超分辨率; MUSIC 算法

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.17.044 **文章编号:** 1002-8331(2009)17-0145-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP212

1 引言

正交频分复用 (OFDM) 是一种多载波数字调制技术, 是 3G/4G 通讯的核心技术之一^[1]。它具有较高的频谱利用率和很强的抗信道频率选择性衰落的能力。OFDM 的天线阵列接收系统利用了天线的空间域特性, 性能优于传统的 OFDM 系统, 这已在 IEEE802.16 标准中使用。OFDM 天线接收结构分成 PRE-FFT 和 POST-FFT 两大类, 后者是最大信噪比意义上的最优方法^[2-4]。

无线定位过程中来波到达时间 (TOA) 和到达角度 (AOA) 是主要的定位所需估测量。在存在可视路径 (Line of Sight, LOS) 的多径环境中, 利用接收信号中首达路径 (First Arrive Path, FAP) 的 TOA 和 AOA 就可以确定移动台的位置。因此 TOA/AOA 的估计精度直接影响定位的精度。

应用 MUSIC 超分辨率算法对 OFDM 系统进行 TOA 和 AOA/DOA 联合估计是本文研究对象。通过信道频率响应 (Channel

Frequency Response, CFR) 进行超分辨率时延估计, 得出 FAP 的时延估计和 TOA。利用同样的方法对天线阵列的接收信号进行超分辨率到达角度估计, 得到 FAP 的到达角度。联合 TOA/AOA 的估计值在二维平面内确定移动台位置。仿真表明, 该算法在低信噪比情况下也能够达到很高的定位精度, 满足只有一个基站或接入点情况下的室内定位要求。

2 算法原理

2.1 OFDM 信号与多天线接收

OFDM 发射信号如式 (1):

$$s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j2\pi kn/N} \quad (1)$$

其中 d_k 为用户数据。假设 OFDM 信号的循环前缀的长度大于信道脉冲响应, 信道在一个符号周期内保持不变, 即信道是慢

作者简介: 陈奎 (1971-), 男, 博士研究生, 研究方向: 无线网络和宽带通讯技术; 徐钊 (1955-), 男, 博士、教授、博士生导师, 研究方向: 光纤通讯和多媒体监控网络。

收稿日期: 2009-02-17 **修回日期:** 2009-04-16

衰落的。那么,离散化的信道脉冲响应 CIR 可以用式(2)表示。

$$h(\tau) = \sum_{l=1}^{L_p} \alpha_l \delta(\tau - \tau_l) \quad (2)$$

考虑均匀线性天线阵(Uniform Linear Array,ULA),包含 M 个独立的全向天线,间距为 d ,如图 1 所示。天线阵列接收信号的矩阵形式如下:

$$y[n] = \sum_{l=1}^{L_p} \alpha_l \cdot a(\theta_l) \cdot s[n - \tau_l] + w[n] \quad (3)$$

在式(2)、式(3)中, α_l 为各路径的复增益, L_p 为信道路径个数, τ_l 为路径时延, $a(\theta_l)$ 为 ULA 天线阵列的导向向量(Steering Vector)或空间响应(Spatial Response), θ_l 为平面波第 l 个路径的到达角度(Angle of Arrival), $w[n]$ 是 高 斯 白 噪 声 向 量。

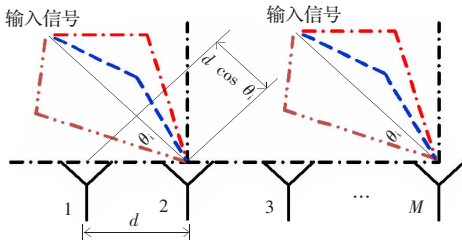


图 1 天线阵列及其多径接收示意图

2.2 MUSIC 算法原理

MUSIC 算法是一种常用的参数估计方法^[5-7]。它根据采样序列自相关矩阵的奇异值分解(SVD),将特征空间划分为互补正交的信号子空间和噪声子空间,利用子空间的正交性获得频谱估计的结果,理论上具有无限小的频率分辨率。自相关矩阵 R_{xx} , 有

$$R_{xx} = E\{x \cdot x^H\} = R_s + R_{noise} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,自相关矩阵 R_{xx} 可以被写成信号自相关矩阵 R_s 和噪声自相关矩阵 R_{noise} 的和。显然 R_s 是 $N \times N$ 矩阵,其秩为 R ,那么对应噪声向量的 $N-R$ 个特征值都是零特征值。 R 个高的特征向量正交于噪声向量,这是算法的基础。通过式(5)定义的伪谱(Pseudo-Spectrum)曲线的 R 个峰值估计出待估计数据。

$$P_{music}(v) = \frac{1}{\sum_{r=1}^{N-R} \|P_{\omega} s(t)\|^2} \quad (5)$$

式(5)中 P_{ω} 是信号空间在噪声空间上的投影。本文将其应用到信道频率响应(CFR)序列,在频域内进行信道时延估计进而获得信号的 TOA 估计,再应用到天线阵列的接收信号获得信号的到达角度 AOA/DOA。

3 TOA/AOA 联合估计

3.1 基于 MUSIC 的 TOA 估计

通过傅立叶变换将式(2)变换到频域:

$$H(f) = \sum_{l=0}^{L_p-1} \alpha_l e^{-j2\pi f \tau_l} \quad (6)$$

如果把式(6)中的 f 视为时间轴上的量, τ_l 视为频率轴上的量,那么 $H(f)$ 可视为一个多频率成分的时域信号,利用时域超分辨率的谱估计理论进行 τ_l 估计,那么 $\hat{\tau}_0$ 是 FAP 的 TOA 估计。

对 $H(f)$ 采样,即在 $[f_0, f_0 + BW]$ 范围内等间隔取 L 个频率点,

获得频率响应 CFR 序列: $x(i), i=0, 1, \dots, L-1$, 则,

$$x(i) = H(i) + e(i) = \sum_{k=0}^{L_p-1} \alpha_k e^{-j2\pi(f_0 + i\Delta)\tau_k} + e(i) \quad (7)$$

式(7)中 $e(i)$ 是均值为 0, 方差为 σ^2 的高斯白噪声,那么式(7)可以写成矩阵的形式:

$$X = H + E = S\alpha + E \quad (8)$$

其中: $X = [x(0) \ x(1) \ \dots \ x(L-1)]^T$

$$H = [H(0) \ H(1) \ \dots \ H(L-1)]^T$$

$$S = [s(\tau_0) \ s(\tau_1) \ \dots \ s(\tau_{L-1})]$$

$$s(\tau_k) = [1 \ e^{-j2\pi\Delta\tau_k} \ \dots \ e^{-j2\pi(L-1)\Delta\tau_k}]^T$$

$$\alpha = [\alpha'_0, \alpha'_1, \dots, \alpha'_{L_p-1}]^T \quad \alpha_k = \alpha_k e^{-j2\pi f_0 \tau_k}$$

$$E = [e(0) \ e(1) \ \dots \ e(L-1)]^T$$

计算 X 的自相关矩阵 R_{xx} 有:

$$R_{xx} = E\{x \cdot x^H\} = SPS^H + \delta^2 I \quad (9)$$

对 R_{xx} 进行 MUSIC 伪谱计算,第一个伪谱峰对应的时间作标 $\hat{\tau}_0$ 就是 FAP 的到达时间 TOA。

3.2 DOA/AOA 估计

OFDM 多天线接收如图 1 所示,图中每个天线单元接收信号有 L_p 条路径。第 k 个子载波的空间响应向量,其维度为 $M \times L_p$, 可以表示成:

$$H_{(k)} = H(f) \Big|_{f = \frac{2\pi k}{N}} = \sum_{l=1}^{L_p} \gamma_{(k),l} \cdot a(\theta_l) \quad (10)$$

其中 $a(\theta_l) = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_{L_p})]^T$ 是各路径的方向向量,

$\gamma_{(k),l} = e^{-j\frac{2\pi k d_l}{N}} \cdot \alpha_l(n)$ 。那么在第 j 天线上的接收信号为:

$$y^{(j)}(n) = s(n)H^{(j)}(n) + I^{(j)}(n) + W^{(j)}(n) \quad j=1, 2, \dots, M \quad (11)$$

$I(n)$ 是用户间干扰或载波间干扰, $W(n)$ 是高斯白噪声。天线阵列总的接收信号为:

$$Y(n) = [y^{(1)}(n) \ y^{(2)}(n) \ \dots \ y^{(M)}(n)]^T, k=1, 2, \dots, N \quad (12)$$

对每个天线单元的接收信号应用 N 点 DFT 运算后,第 k 个子载波接收变成 r_k :

$$r_k = [r_k^{(1)} \ r_k^{(2)} \ \dots \ r_k^{(M)}]^T \quad k=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

r_k 的相关矩阵有:

$$R_k = E\{r_k \cdot r_k^H\} = SPS^H + \delta^2 I \quad (14)$$

R_k 是一个 $M \times M$ 矩阵。因为 OFDM 信号具有 K 个载波,应用 MUSIC 算法之前对各载波的 R_k 进行线性处理,可以使用聚焦矩阵^[8,13],也可选取部分子载波的 R_k 平均得到 $\tilde{R}^{[2,7]}$ 。对 \tilde{R} 再进行超分辨率 MUSIC 估计得到信号的 DOA/AOA 信息。

3.3 联合 TOA/AOA

如 3.1 和 3.2 节所述,OFDM 信号联合 TOA 和 AOA 定位使用相同的算法对信道频率响应和阵列接受信号进行处理。信道估计可以使用全部天线单元或指定天线单元,时延估计可在指定天线单元上平均。由于多径的影响,首径不一定是最强路径,仿真采用动态阈值的方法确定首径的伪谱峰。在各径的 DOA/AOA 估计值中,本文采用 TOA 估计时的首径伪谱峰值的大小来确定 DOA 伪谱中属于首径的峰值。

设基站和移动台的位置分别为: (x_{BS}, y_{BS}) 和 (x, y) , 那么它们满足下式:

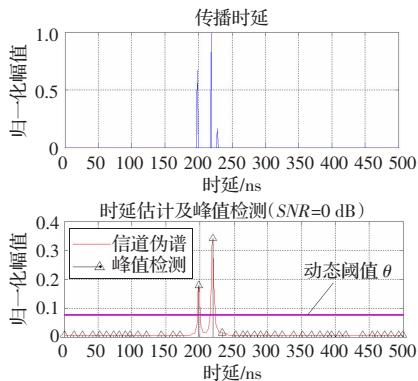


图2 时延估计和 TOA 检测

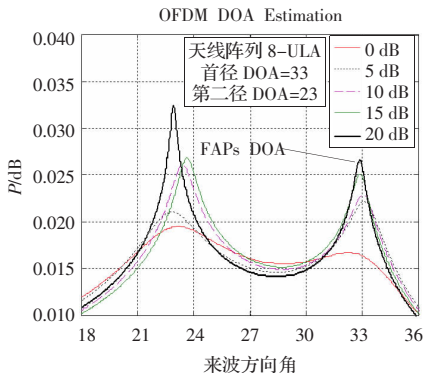


图3 DOA 估计与 SNR 关系

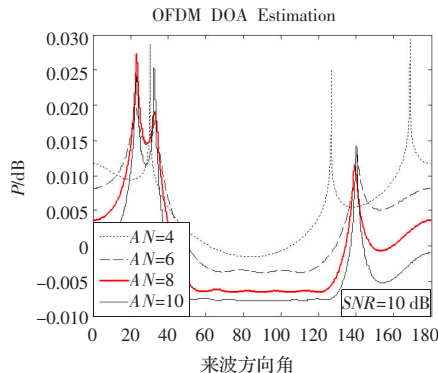


图4 DOA 估计和天线数量关系

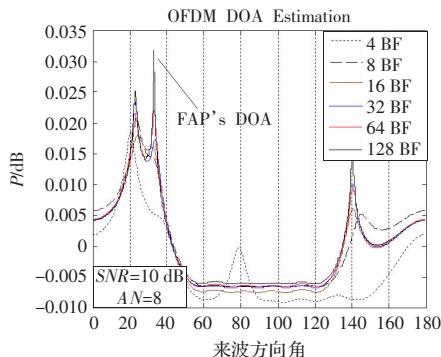


图5 OFDM 波束的数量和 DOA 估计关系

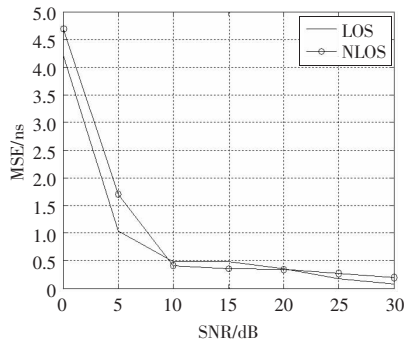


图6 LOS/NLOS 情况下 TOA 估计的均方误差

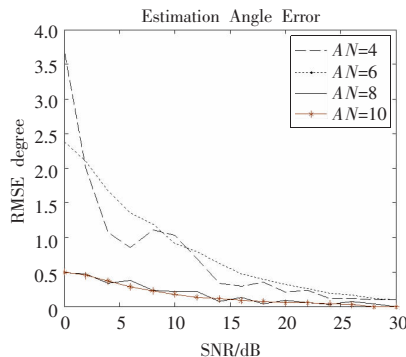


图7 DOA 估计的 RMSE 误差

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{BS} \\ y_{BS} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \times \cos(DOA) \\ R \times \sin(DOA) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中 $R=TA \times c$ 。联合 TOA/AOA 方法的最大好处是只需要一个基站就可以完成对移动台的定位,特别适合只有一个接入点或基站的室内无线定位的需要。

4 仿真实验及结果分析

OFDM 系统仿真参数、信道状况如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	符号	参数值		
天线单元数	M	4~10		
OFDM 载波数	N	128		
采样周期	Ts	50 ns		
OFDM 带宽	B	20 MHz		
天线间隔	d/lambda	0.5		
路径	时延/ns	入射角度/(°)	归一化幅值	
用户	1	200	33	0.666 7
	2	220	23	1
	3	230	140	0.166 7

(1)TOA 估计:图 2 显示了一个 3-tap 信道的时域脉冲响应和频域 MUSIC 谱峰。设置移动台测试距离为 60m,对应 FAP 到达时间 $\tau_0=200$ ns。图中虚线为动态阈值 θ ,首个大于 θ 的峰值对应的时间坐标就是 FAP 的到达时间 $\hat{\tau}_0$,即 TOA。图 2 显示 SNR=0 dB 时,伪谱峰值和时域脉冲能够很好的对应, $\hat{\tau}_0$ 估计值 204 ns。

(2)仿真 DOA:图 3~图 5 是对信道各路径 DOA 的估计结果。图 3 表明天线数目一定时,伪谱峰值随着信噪比的增加逐渐尖锐,各径的分辨率提高。SNR=0 dB 时,前两条路径基本上可以分辨出来,但是峰值不明显。SNR=20 dB 时,两径的峰值尖锐并趋向真实的入射角度。图 4 表明天线单元的数量决定了入

射角度的分辨率。SNR=10 dB 时,4 个天线单元对三条路径的估计不成功,6 个以上天线时,峰值就可以清晰地区分出来。另外的仿真表明,即使很低的信噪比(-10 dB),增加天线数量仍可以分辨各径的 DOA。阵列天线接收信号 FFT 后,在载波中等间距选用几个载波计算相关矩阵,取平均后计算伪谱。图 5 中显示选择载波个数 DOA 估计性能的影响。仿真中的 128 个载波理论上具有最好的性能。随着选取载波个数的减少性能变坏。当选取 32 个载波时,伪谱谱峰可清晰区分。

(3)仿真定位误差:在各种信噪比下运行 100 次 TOA/AOA 估计算法,得到的估计值的均方根误差(Root-Mean-Square-Error, RMSE)曲线如图 6~7 所示。图 6 中的 LOS 信道参数设置是将表 1 中路径 1、路径 2 的归一化幅值对调。从图 6~7 中看出,随着 SNR 的增加,TOA/AOA 的 RMSE 误差显著减少,天线单元的数量越多 RMSE 误差越小,这和前面的仿真结果吻合。当 SNR=10 dB 时,TOA 估计误差仅为 0.5 ns,对应测距误差 0.15 m,8 天线的 DOA 估计误差为 0.24°,在定位半径为 60 m 时,对应的误差距离为 0.251 m,两者结合的平面误差为 0.29 m。

5 结语

将 OFDM 技术应用到无线定位是目前的研究热点之一。文中利用超分辨率 MUSIC 算法对 OFDM 信号进行联合 TOA 和 AOA 估计以满足只有一个接入点或基站的室内环境下的无线定位的需求。OFDM 多天线处理及波束形成对无线定位精度、稳定性的影响是以后进一步研究的对象之一。

参考文献:

[1] Olsson M. Contributions to delay, gain, and offset estimation [D]. Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, 2008.