

DOI:10.13203/j.whugis20180178



文章编号:1671-8860(2018)12-2167-06

利用双天线商用 WiFi 信道状态信息估计到达角

柳景斌¹ 黄百川¹ 张 斌^{2,3} 黎蕾蕾⁴ 杨 帆¹ 张振兵¹ 李 正¹ 童鹏飞¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

3 香港城市大学计算机系,香港 九龙

4 重庆大学航空航天学院,重庆,400044

摘 要:商用 WiFi 接收模块可以提供比接收无线信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)更细粒的信道状态信息(channel state information, CSI),利用 3 根天线获取 CSI 进行方位到达角(angle of arrival, AOA)估计已成为现实。利用正交频分复用技术(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)将 2 根天线拓展为 60 个虚拟天线阵,将前向平滑算法拓展到二维前向平滑算法。利用仿真的非相干信号源和相干信号源数据进行实验,结果表明,在只利用 2 根接收天线的前提下也能实现基于商用 WiFi 信号的方位角的 AOA 估计,所提出的 2 根天线的虚拟天线阵模型和二维前向平滑算法具有有效性和适用性。

关键词:信道状态信息(CSI);到达角(AOA);虚拟天线阵;二维前向平滑

中图分类号:P228

文献标志码:A

近年来,对基于位置的服务(location based service, LBS)的需求越来越大,普适导航与室内定位技术在 LBS 中发挥着重要作用。

目前室外定位技术发展较为成熟,主要有全球卫星导航系统和基于移动基站的蜂窝无线定位系统。全球卫星导航系统有中国的北斗系统、美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统和欧盟的 Galileo 卫星导航系统。基于移动基站的蜂窝无线定位系统主要有基于移动平台的定位、基于网络的定位和基于移动平台、网络的混合定位。室外定位技术无法在室内完成定位^[1]。室内定位技术中的主流技术有 WiFi 定位、蓝牙定位、ZigBee 定位、射频(radio frequency, RFID)定位、超宽带(ultra wideband, UWB)定位、行人航迹推算(pedestrian dead reckoning, PDR)算法定位以及视觉定位。

1 信号到达角定位研究

在产业界,原诺基亚高精度室内定位技术(high accuracy indoor positioning, HAIP)项目组

成立的 Quuppa 公司,其核心技术是基于蓝牙均匀圆阵列的二维角度估计,其最新的基于蓝牙 5.0 的 7L 系列产品可达 300 m 范围内的精准定位。澳大利亚的 Locata 系统中的单根 V-Ray 天线就能在室内 3D 环境下达到误差为 1° 的角度估计。可以看出,基于民用的天线阵列角度估计逐渐走进公众视野。

基于天线阵列的角度估计需要比接收无线信号强度指示(received signal strength indication, RSSI)更加细粒的信道状态信息(channel state information, CSI)。CSI 属于端口物理层(port physical layer, PHY),来自正交频分复用技术(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)系统下解码的子载波^[2]。一般利用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)或者通用软件无线电外设(universal software radio peripheral, USRP)来获取 CSI 信息。但随着商用 WiFi 接收模块可以提供 CSI 信息,越来越多的学者利用无线网卡进行 CSI 相关研究。有实验证明,将 CSI 建立成指纹数据库,在定位精度上较 RSSI 的指纹库有显著提升^[3-6]。

收稿日期:2018-08-30

项目资助:国家重点研究发展计划(2016YFB0502204);国家自然科学基金(41874031);湖北省技术创新项目(2018AAA070);湖北省自然科学基金(2018CFA007)。

第一作者:柳景斌,博士,教授,主要从事室内和室外定位、智能手机导航、室内移动测绘和 GNSS/INS/SLAM 集成技术研究。jingbin.liu@whu.edu.cn

有学者利用 CSI 通过计算到达角度 (angle of arrival, AOA) 达到了亚米级别的定位^[7-8]。清华大学开发的 WiFi 雷达系统, 使用 WiFi 的 CSI 捕捉人体动作^[9], 北京大学利用 CSI 能探测毫米级的呼吸动作^[10-11]。文献[12]首次提出了 CSI 相位矫正算法, 文献[7, 13]扩展了 CSI 相位矫正算法, 上海交通大学推出了非线性 CSI 相位矫正算法^[14]。伦敦大学学院基于多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术利用 CSI 测量到达角 AOA, 实现了 23 cm 精度的室内定位^[15]。斯坦福大学为了突破天线阵列数, 基于 OFDM 技术首次实现了在 Intel 5300 3 根天线上的 AOA 估计^[7], 此方法被中国重庆邮电大学和美国弗吉尼亚理工学院实验论证^[16]。

目前支持获取商业路由器 WiFi 的 CSI 的无线网卡有 Intel 5300 和高通创锐讯旗下的 AR9590、AR9580、AR9565、AR9462、AR9380、AR9382 等。大多数学者利用 Intel 5300 的 3 根接收天线获取 CSI 信息。本文在学者利用 Intel 5300 实现 3 根接收天线下方位角的 AOA 估计的前提下, 仿真实现 2 根接收天线下方位角 AOA 估计, 使得方位角 AOA 估计适用于绝大多数的无线网卡, 突破天线根数的限制。

2 AOA 估计算法原理

2.1 天线阵模型引入相位误差

图 1 表示当远程信号入射到天线阵列时, 由于入射信号与天线阵列水平线的法线存在夹角 θ , 故入射到天线 1 和天线 2 上的无线信号存在一个大小为 $d\sin\theta$ 的路程差, 这个路程差会导致一个大小为 $-2\pi d\sin\theta \times f \div c$ 的相位差。其中, d 为天线间距, f 为信号频率 (本文中为 2.4 GHz), c 为光速。引入的相位差为 $\Psi_{m,\theta}$ (代表方位角为 θ 的某条路径在第 m 根天线上引起的相对于第一根天线的相位差), 其中 m 为天线序列号。

$$\Psi_{m,\theta} = e^{-j(2\pi(m-1)d\sin\theta \times f \div c)}$$

因为当无线 WiFi 信号的传播路径数大于天线根数时, 多信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 算法无法工作^[7]。为了突破 MUSIC 算法对阵列天线个数大于路径数的限制^[7], 本文基于现有商用 WiFi 的 OFDM 技术, 将 2 根天线扩展到 60 根虚拟天线阵列。基于 OFDM 技术, IEEE 802.11n 下, 无线网卡获取的 WiFi 的 CSI 数据为 30 个子载波, 不同的子载波频率不同, 会导致一个大小为 $-2\pi \times f_\delta \times t_k$ 的相位差。

其中, f_δ 为载波间隔频率, t_k 是第 k 条路径飞行时间。引入的相位差为 Ω_{n,t_k} (代表飞行时间为 t_k 的路径 k 下第 n 个子载波相对于第一个子载波的相位差), 其中 n 为子载波序列号。

$$\Omega_{n,t_k} = e^{-j(2\pi(n-1) \times f_\delta \times t_k)}$$

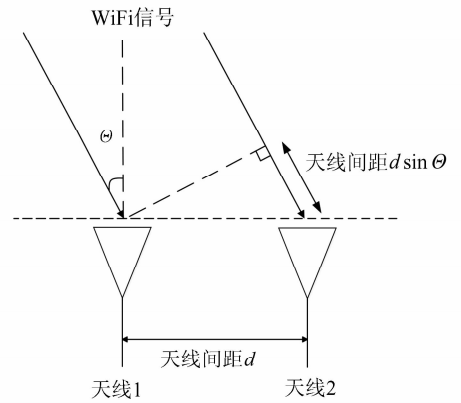


图 1 MUSIC 算法原理示意图

Fig. 1 Diagram of MUSIC Algorithm

2.2 2 根天线的虚拟天线阵估计方位角 AOA

可以利用商用无线网卡获取到商用 WiFi 的 CSI 数据, 其中 CSI 数据是一个 2×30 的矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \cdots & I_{1,29} & I_{1,30} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \cdots & I_{2,29} & I_{2,30} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $I_{m,n}$ 代表第 m 根天线上的第 n 个子载波。将 2 根天线拓展为虚拟的 60 根天线后, 阵列接收信号 X 为一个 60×1 的矩阵。

$$X = [I_{1,1} \quad \cdots \quad I_{1,30} \quad I_{2,1} \quad \cdots \quad I_{2,30}]^T \quad (2)$$

根据 MUSIC 算法可知:

$$X = AS + N \quad (3)$$

式中, S 是一个 $k \times 1$ 的矩阵, $S = [S_1 \quad S_2 \quad \cdots \quad S_k]^T$, 每一条路径即对应一个信号 S_k ; N 是一个 60×1 的噪声矩阵; A 是一个 $60 \times k$ 的矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} \Psi_{1,\theta_1} \Omega_{1,t_1} & \Psi_{1,\theta_2} \Omega_{1,t_2} & \cdots & \Psi_{1,\theta_k} \Omega_{1,t_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Psi_{1,\theta_1} \Omega_{30,t_1} & \Psi_{1,\theta_2} \Omega_{30,t_2} & \cdots & \Psi_{1,\theta_k} \Omega_{30,t_k} \\ \Psi_{2,\theta_1} \Omega_{1,t_1} & \Psi_{2,\theta_2} \Omega_{1,t_2} & \cdots & \Psi_{2,\theta_k} \Omega_{1,t_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Psi_{2,\theta_1} \Omega_{30,t_1} & \Psi_{2,\theta_2} \Omega_{30,t_2} & \cdots & \Psi_{2,\theta_k} \Omega_{30,t_k} \end{bmatrix}$$

A 也可以表达为:

$$A = [a(\theta_1, t_1) \quad a(\theta_2, t_2) \quad \cdots \quad a(\theta_k, t_k)]$$

将得到的 X 代入 MUSIC 算法, 计算协方差矩阵 $R_{XX} = E\{XX^H\}$, 其中 X^H 是 X 的共轭转置矩阵。利用 MUSIC 算法可以构造空间谱 P_{MUSIC}

(Θ, t) 函数为:

$$P_{\text{MUSIC}}(\Theta, t) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\Theta, t) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\Theta, t)} \quad (4)$$

式中, \mathbf{E}_n 是 \mathbf{R}_{XX} 的特征矩阵。当 $\mathbf{a}(\Theta, t)$ 与 \mathbf{E}_n 的各列正交时, 分母为 0, 但是由于噪声的存在, 使得 $P_{\text{MUSIC}}(\Theta, t)$ 谱存在一个尖峰, 可以改变 Θ 和 t , 通过寻找波峰来估计到达方位角度和飞行时间。

2.3 二维前向平滑算法去相干信号

空间谱估计 MUSIC 算法的核心就是对协方差矩阵 \mathbf{R}_{XX} 的特征值的分析,

$$\mathbf{R}_{\text{XX}} = \mathbf{E}\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\} = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \mathbf{R}_n \quad (5)$$

式中, 信号相关矩阵 $\mathbf{R}_s = \mathbf{E}\{\mathbf{S}\mathbf{S}^H\}$; 噪声相关矩阵 $\mathbf{R}_n = \sigma^2 \mathbf{I}$, σ^2 是噪声功率, \mathbf{I} 是单位矩阵。如果 \mathbf{S} 的 k 个信号源之间互相独立, 则 $\text{rank}\{\mathbf{R}_s\} = k$, 由 \mathbf{R}_{XX} 特征值分解就可以得到 k 个较大的特征值及其对应的信号子空间和 $(60 - k)$ 个特征值及其对应的噪声子空间。此时, $\mathbf{a}(\Theta, t)$ 与噪声子空间正交, 通过信号零点确定来波方向。但是, 如果 k 个信号源之间有某些信号完全相干, 且在实际室内环境中, 多径效应也会造成不同路径信号之间存在相干的情况, 此时 $\text{rank}\{\mathbf{R}_s\} < k$, 导致此时 $\mathbf{a}(\Theta, t)$ 与噪声子空间不正交, 造成信号零点的漏检测和谱峰误判。

目前一般进行去平滑的空间平滑技术包括前向平滑和前后向平滑来处理相干信号, 使得两个相关的信号同时进入不同的子阵列^[17-19]。

对 2×30 的 CSI 数据式(1)进行平滑, 把一维的前向平滑拓展到 2 维前向平滑, 针对 2 根天线组成的 60 根虚拟天线进行平滑。

由文献[19]中相干信号源处理的定理可知, 只要子阵元数大于信号源个数 k , 且子阵数大于或等于信号源个数 k 时, 就可以把 k 个相干的信号源平滑为 k 个独立源, 即可达到解相干的目的。其中, 子阵列元数 \times (子阵行元数 + 子阵数 - 1) = 总阵元数。

利用在天线序号方向子阵列元数为 2, 在子载波利用序号方向子阵行元数为 15 对, 总阵元数为 60 的天线阵进行平滑, 此时子阵元数为 30 个, 子阵数为 16 个, 即每个子阵的阵元为 30 个。其中, 子阵列元数 \times 子阵行元数 = 子阵元数。

图 2 中 1-1 代表第一根天线的第一个子载波, X_1 代表子载波序号方向的第一个子阵列, Y_1 代表天线序号方向的第一个子阵列。

利用上述二维前向平滑后的 \mathbf{X} 为一个 30×16 的矩阵:

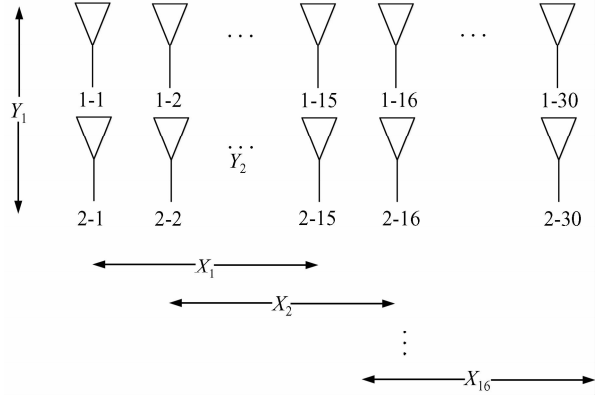


图 2 二维前向平滑示意图

Fig. 2 Two-Dimensional Forward Smoothing

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \cdots & I_{1,16} \\ \vdots & & & \vdots \\ I_{1,15} & I_{1,16} & \cdots & I_{1,30} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \cdots & I_{2,16} \\ \vdots & & & \vdots \\ I_{2,15} & I_{2,16} & \cdots & I_{2,30} \end{bmatrix}$$

此时, \mathbf{A} 为 $30 \times k$ 的矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \Psi_{1,\theta_1} \Omega_{1,t_1} & \Psi_{1,\theta_2} \Omega_{1,t_2} & \cdots & \Psi_{1,\theta_k} \Omega_{1,t_k} \\ \vdots & & & \vdots \\ \Psi_{1,\theta_1} \Omega_{15,t_1} & \Psi_{1,\theta_2} \Omega_{15,t_2} & \cdots & \Psi_{1,\theta_k} \Omega_{15,t_k} \\ \Psi_{2,\theta_1} \Omega_{1,t_1} & \Psi_{2,\theta_2} \Omega_{1,t_2} & \cdots & \Psi_{2,\theta_k} \Omega_{1,t_k} \\ \vdots & & & \vdots \\ \Psi_{2,\theta_1} \Omega_{15,t_1} & \Psi_{2,\theta_2} \Omega_{15,t_2} & \cdots & \Psi_{2,\theta_k} \Omega_{15,t_k} \end{bmatrix}$$

其中,

$$\mathbf{a}(\Theta, t) = \begin{bmatrix} \Psi_{1,\theta} \Omega_{1,t} \\ \vdots \\ \Psi_{1,\theta} \Omega_{15,t} \\ \Psi_{2,\theta} \Omega_{1,t} \\ \vdots \\ \Psi_{2,\theta} \Omega_{15,t} \end{bmatrix}$$

代入 MUSIC 算法中空间谱 $P_{\text{MUSIC}}(\Theta, t)$ 估计函数计算即可求得方位角。当利用两根天线能够估计方位角的 AOA 时, 仅利用 3 根天线组成三角阵就可以联合估计方位角和俯仰角。

3 仿真结果

3.1 不相干信号仿真

在第 1 组实验中假设了 3 组非相干信号源, 其方位角的 AOA 分别是 -40° 、 -10° 和 30° , 其对应的飞行时间 (time of flight, TOF) 分别是 73 ns、18 ns 和 50 ns。其中, AOA 为正, 代表信号从以天线阵直线为分割线的上平面入射, AOA 为

负,代表信号从以天线阵直线为分割线的下平面入射(见图1,此时信号的AOA为正角)。

运用2根天线的虚拟天线阵模型仿真结果如图3所示。

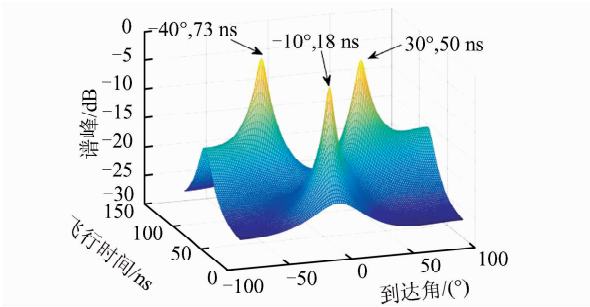


图3 非相干信号仿真结果

Fig. 3 Results for the Incoherent Signals

为了从耗时层次说明算法的优越性,分别仿真了1、2、3、4、5、6根天线进行AOA估计,运行结果见表1。

表1 不同根数天线仿真耗时

Tab. 1 Simulation Time of Different Antennas

天线根数	信号源 1	信号源 2	信号源 3	运行时间/s
1	70 ns	18 ns	52 ns	1.295
2	-40°, 73 ns	-10°, 18 ns	-30°, 50 ns	2.190
3	-40°, 73 ns	-10°, 18 ns	-30°, 50 ns	3.311
4	-40°, 73 ns	-10°, 18 ns	-30°, 50 ns	5.092
5	-40°, 73 ns	-10°, 18 ns	-30°, 50 ns	7.541
6	-40°, 73 ns	-10°, 18 ns	-30°, 50 ns	10.917

从表1中可以看出,1根天线时是无法解算出方位角AOA的,因为当只有1根天线时,不存在因为天线物理间距造成的相位差。在非相干信号下,从第2根天线开始,都能够较好地解算出方位角AOA和TOF,随着天线根数的减小,运行效果有显著提高,这对实时性要求严格的精准快速室内定位有着重要意义。2根天线的运行时间相比于3根天线提高了33.85%的效率,天线根数越多,运行效率越慢。

3.2 相干信号仿真

在第2组实验中,假设了3组部分相干信号源,其方位角AOA分别是-40°、-10°和30°,其对应的TOF分别是73 ns、18 ns和50 ns。其中(-40°, 73 ns)和(30°, 50 ns)这两个信号源直接互相相干,若不运用二维前向平滑算法,则方位角AOA估计结果如图4所示,得到了两组估计值。因为(-40°, 73 ns)和(30°, 50 ns)这两组信号源互相相干,所以没有被估计正确,而(-10°, 18 ns)这组信号源相对独立,被正确解算。

针对第2组实验中存在的部分相干信号源,

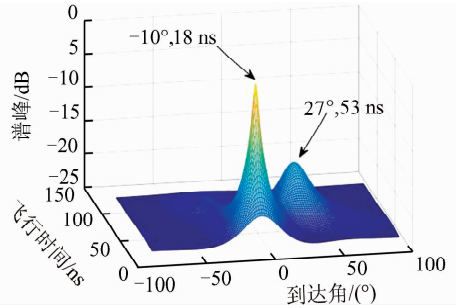


图4 不完全相干信号非平滑仿真结果

Fig. 4 Results for Partially Coherent Signals Without Smooth Algorithm

运用二维前向平滑算法得到的结果如图5所示,(-40°, 73 ns)和(30°, 50 ns)这两组相干的信号源被正确估计。

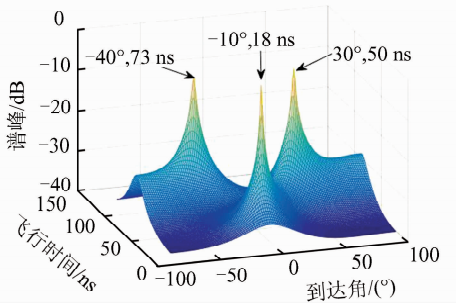


图5 不完全相干信号平滑仿真结果

Fig. 5 Results for Partially Coherent Signals with Smooth Algorithm

在第3组实验中假设了3组完全相干信号源,其方位角AOA分别是-40°、-10°和30°,其对应的TOF分别是73 ns、18 ns和50 ns。其中3组信号源两两相关,若不运用二维前向平滑算法,方位角AOA估计结果如图6所示,空间谱估计只得到了一个(-21°, 10 ns)的谱峰,这和本

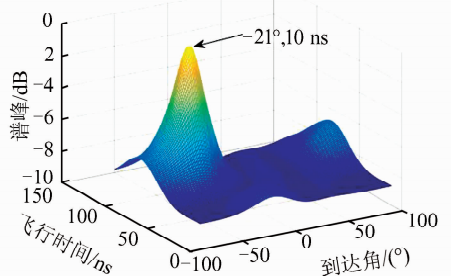


图6 完全相干信号非平滑仿真结果

Fig. 6 Results for All Coherent Signals Without Smooth Algorithm

文假设的信号源相差较大,原因是相干信号叠加导致 $\text{rank}\{\mathbf{R}_s\} < 3$,此时 $\mathbf{a}(\theta, t)$ 与噪声子空间不正交,从而造成漏检测谱峰和谱峰值误判。

针对第3组实验中存在的完全相干信号源,

运用二维前向平滑算法得到的结果如图 7 所示, $(-40^\circ, 73 \text{ ns})$ 、 $(30^\circ, 50 \text{ ns})$ 和 $(-10^\circ, 18 \text{ ns})$ 这 3 组信号源都被正确估计。

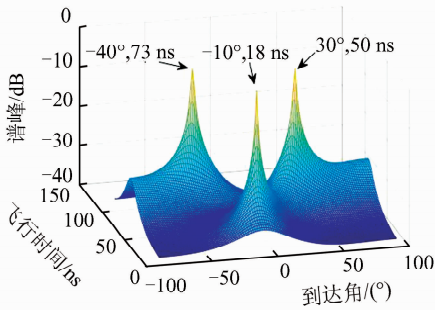


图 7 完全相干信号平滑仿真结果

Fig. 7 Results for All Coherent Signals with Smooth Algorithm

因此,基于 2 根天线的虚拟天线阵模型结合二维前向平滑算法能较好地非相干信号和相干信号的方位角 AOA 估计。

4 结 语

2 根天线的虚拟天线阵模型和二维前向平滑算法,在仿真结果中能很好地独立估算出多个信号源的方位角 AOA 和 TOF,在只利用 2 根接收天线的情况下,仿真实现了基于商用 WiFi 信号的方位角 AOA 估计。

随着 CSI 信息获取与应用的普及,有望看到毫米级呼吸检测^[10-11]与高精度的室内定位方案的落地。目前 Google Nexus 5 等一系列手机都可以获取 WiFi 的 CSI 信息^[20-21]。当绝大多数的智能手机获取 CSI 信息的方式取代现有智能手机端获取无线信号 RSSI(received signal strength indication)的方式时,CSI 将大有可为,基于智能手机端的 CSI 获取也会给室内定位带来新的发展机遇。

参 考 文 献

[1] Pei L, Chen R, Liu J, et al. Using Inquiry-Based Bluetooth RSSI Probability Distributions for Indoor Positioning[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2010, 9(2):122-130

[2] Yang Z, Zhou Z, Liu Y. From RSSI to CSI: Indoor Localization Via Channel Response[J]. *ACM Computing Surveys*, 2013, 46(2):1-32

[3] Zhou M, Zhang Q, Xu K, et al. PRIMAL: Page Rank-Based Indoor Mapping and Localization Using Gene-Sequenced Unlabeled WLAN Received Signal Strength[J]. *Sensors*, 2015, 15(10):24 791-24 817

[4] Chen Ruizhi, Chen Liang. Indoor Positioning with Smartphones: The State-of-Art and the Challenges [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10):1 316-1 326(陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10):1 316-1 326)

[5] Li Zhen, Huang Jingsong. WiFi Positioning Using Robust Filtering with RSSI[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(3): 361-366 (李桢, 黄劲松. 基于 RSSI 抗差滤波的 WiFi 定位[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(3): 361-366)

[6] Hu Andong, Wang Jian, Wang Yunjia, et al. A Fusion Positioning for PDR and WiFi Based on Fading Adaptive Weighted EKF[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(11): 1 556-1 562 (胡安冬, 王坚, 汪云甲, 等. 利用渐消自适应 EKF 算法进行 PDR-WiFi 融合定位[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2016, 41(11): 1 556-1 562)

[7] Kotaru M, Joshi K, Bharadia D, et al. SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi[J]. *ACM Sigcomm Computer Communication Review*, 2015, 45(4):269-282

[8] Tian Z, Li Z, Zhou M, et al. PILA: Sub-meter Localization Using CSI from Commodity WiFi Devices [J]. *Sensors*, 2016, 16(10):1 664-1 684

[9] Qian K, Wu C, Yang Z, et al. Enabling Contactless Detection of Moving Humans with Dynamic Speeds Using CSI[J]. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2018, 17(2):1-18

[10] Wang Yuxiang, Li Shengjie, Wang Hao, et al. Survey on WiFi Based Contactless Activity Recognition [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(4):648-654(王钰翔, 李晟洁, 王皓, 等. 基于 WiFi 的非接触式行为识别研究综述 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2017, 51(4):648-654)

[11] Wang H, Zhang D, Ma J, et al. Human Respiration Detection with Commodity WiFi Devices: Do User Location and Body Orientation Matter? [C]. *ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, Heidelberg, Germany, 2016

[12] Xie Y, Li Z, Li M. Precise Power Delay Profiling with Commodity WiFi[C]. *ACM Mobi Com*, Paris, France, 2015

[13] Sen S, Radunovi B, Choudhury R R, et al. Spot Localization Using PHY Layer Information [C]. *ACM Conference on Mobile Computing and Networking*, Paris, France, 2015

- [14] Zhuo Y, Zhu H, Xue H, et al. Perceiving Accurate CSI Phases with Commodity WiFi Devices [C]. IEEE Conference on Computer Communications, Atlanta, GA, USA, 2017
- [15] Xiong J, Jamieson K. ArrayTrack: A Fine-Grained Indoor Location System [C]. Usenix Conference on Networked Systems Design and Implementation, Seattle, WA, USA, 2013
- [16] Gaebel E, Zhang N, Lou W, et al. Looks Good to Me: Authentication for Augmented Reality [C]. ACM International Workshop on Trustworthy Embedded Devices, Vienna, Austria, 2016
- [17] Zheng Jiansheng, Chen Liwen, Dai Yonghong. Performance Estimates of GNSS Receiver Jamming with Adaptive [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(8): 1 006-1 011 (郑建生, 陈鲤文, 代永红. GNSS接收机抗干扰自适应调零技术性能估计 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(8): 1 006-1 011)
- [18] Liu Deshu. Spatial Spectrum Estimation and Its Application [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1997 (刘德树. 空间谱估计及其应用 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997)
- [19] Shan Tiejun, Wax M, Kailath T. On Spatial Smoothing for Direction-of-Arrival Estimation of Coherent Signals [J]. *IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing*, 1985, 33(4): 806-811
- [20] Schulz M, Knapp F, Deligeorgopoulos E, et al. Demo: Nexmon in Action: Advanced Applications Powered by the Nexmon Firmware Patching Framework [C]. The 11th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization, Snowbird, Utah, USA, 2017
- [21] Schulz M, Wegemer D, Hollick M. DEMO: Using NexMon, the C-based WiFi Firmware Modification Framework [C]. ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks, Darmstadt, Germany, 2016

AOA Estimation Based on Channel State Information Extracted from WiFi with Double Antenna

LIU Jingbin¹ HUANG Baichuan¹ ZHANG Bin^{2,3} LI Leilei⁴ YANG Fan¹
ZHANG Zhenbing¹ LI Zheng¹ TONG Pengfei¹

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Department of Computer Science, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China

4 College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: The off-the-shelf WiFi network interface card (NIC) can provide channel state information (CSI) which has more detailed information than received signal strength indication (RSSI). Using three antennas to obtain channel state information of WiFi to estimate yaw angle of arrive (AOA) has become reality. Based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology, this paper uses two antennas instead of three antennas to create a virtual antenna array with 60 antennas instead of 90 antennas and extends the forward smoothing algorithm to the two-dimensional forward smoothing algorithm, then uses experimental data of non-coherent signal and coherent signal in view of multiple signal classification (MUSIC) to verify the algorithm proposed, which can realize yaw angle of arrive estimation just with two antennas instead of three antennas. The virtual antenna array model and two-dimensional forward smoothing algorithm with two antennas proposed in this paper have validity and applicability.

Key words: channel state information; angle of arrive; virtual antenna array; two-dimensional forward smooth algorithm

First author: LIU Jingbin, PhD, professor, specializes in indoor and outdoor positioning, smartphone navigation, indoor mobile mapping, and GNSS/INS/SLAM integration technology. E-mail: jingbin.liu@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFB0502204; the National Natural Science Foundation of China, No. 41874031; the Technology Innovation Program of Hubei Province, No. 2018AAA070; the Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2018CFA007.