

基于 VHF-FM 微波段的室内人体探测方法

汪 照, 李有明*, 朱 星

(宁波大学 通信技术研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 提出一种基于甚高频调频广播(VHF-FM)微波段的室内人体探测方法, 该方法是根据 VHF-FM 天线阵列接收机接收到的数据做空时相关处理得到信号子空间特征向量, 并将信号子空间特征向量映射为相应的代价值进行探测. 在静态无人, 室内环境没发生改变时, 代价值基本没有太大变化; 而当有人进入, 室内环境发生改变时, 代价值会发生明显的变化. 研究结果表明: 该方法能够很好地区分室内静态无人环境和动态有人环境, 且不容易受到噪声环境的影响, 具有稳定、准确的探测性能.

关键词: VHF-FM; 室内人体探测; 天线阵列; 特征向量

中图分类号: TN95

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2014) 02-0040-04

安全防范是一个历史范畴的概念, 它是社会公共安全的一部分, 当然家庭安全也不例外. 随着科学技术的进步, 电子侦测技术逐渐普及, 它对盗窃事件起到很好的防范作用, 避免了许多重大财产损失. 传统的视频监控技术和红外探测技术虽然在安防领域里起到了很大的作用, 但也存在一定的局限. 视频监控^[1-2]是通过光学成像、图像处理等一系列技术获得人体图像, 虽然它容易捕捉, 但是探测视角有限, 不够隐蔽. 红外探测技术^[3-4]是根据人体正常情况下会发出特定波长的红外线而进行检测处理, 虽然它不产生辐射、器件功耗小, 但容易受各种热源、阳光干扰, 尤其环境温度与人体温度接近时, 探测性能会明显下降. 因此, 一些新型的技术在不断的提出, 而大多主要是微波技术^[5-8].

文献[5]分析了多普勒微波入侵报警探测技术, 并从多普勒微波入侵报警探测技术的基本原理入手, 阐述了多普勒微波入侵报警探测技术的特点、应用现状及其对未来发展方向的展望. 文献[6]提出用超宽带脉冲波(UWB-IR)作为室内探测系统, 它是通过比较在有人和无人入侵时的延迟功率分

布的不同进行检测. 由于室内电磁波的反射和衍射特性, 它的探测范围很广, 且安装成本较低, 只需一对发射机和接收机. 然而延迟功率分布是基于接收信号强度(RSS), 它容易受噪声影响, 即使在静态环境下也可能会有大的波动, 所以很难设置它的事件探测门限. 另外, UWB-IR 是一种超宽带信号, 所以系统设计上较复杂. 同样基于 RSS, 用 WLAN 做室内探测系统在文献[7]中提到, 该系统将所有的接入点 RSS 组成一个 RSS 矢量, 然后对有人与无人情况下的 RSS 矢量作比较. 虽然系统不是很复杂, 不需要特别的硬件, 但它不能很好地配置接入点. 文献[8]已利用了室内 UHF-TV 微波多径传播效应探测到人体存在.

笔者提出了基于 VHF-FM 微波段的室内人体探测方法, 该方法用信号子空间特征向量作为室内人体探测. 在中国 VHF-FM 频段为 88~108 MHz, 空间中存在这些频率点处的电磁波, 通过选择其中一个作为发射端的频率点, 对应的接收端可以设置相同频率点. 因此, 设计的系统不需要发射机, 只需要在接收方通过 VHF-FM 天线阵列的接收机接收信号, 从而降低了成本. 该系统中 VHF-FM 天

收稿日期: 2013-03-05.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61071119); 宁波市自然科学基金(2012A610017); 宁波市科技创新团队研究计划(2011B81002); 浙江省大学生创新创业孵化项目(2012R405068).

第一作者: 汪 照(1987—), 男, 湖北孝感人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: OFDM 中的资源分配等. E-mail: 598329439@qq.com

*通信作者: 李有明(1963—), 男, 陕西扶风人, 博导/教授, 主要研究方向: 宽带接入技术等. E-mail: liyouming@nbu.edu.cn

线阵列接收机接收数据, 并经过空时相关处理得到信号空间与噪声空间及信号空间对应的特征向量, 再将信号子空间特征向量映射为相应的代价值. 在无人情况下, 代价值没有大的变化, 但是一旦有人入侵, 代价值将会有明显的变化. 实验表明, 该方法能够很好地区分室内有人或无人时环境的变化.

1 室内人体探测基本原理

图 1 和图 2 给出了室内静态无人环境与室内环境改变时, 无线电波的传输示意图. 在室内, 无线电波遇到家具、墙壁、金属物体等会有反射、折射或衍射现象, 在静态无人环境下, 信号基本上沿着固定的路径传输, 天线阵列接收机接收到的数据经空时相关处理得到的信号子空间特征向量映射的代价值基本上不会变化. 而当有人进入, 环境发生改变, 信号的传输路径及衰减幅度会发生变化, 其经空时相关处理得到的信号子空间特征向量映射的代价值也会发生变化.

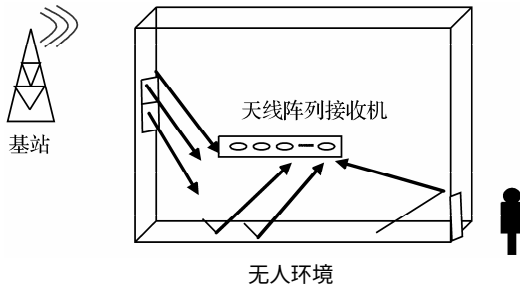


图 1 室内静态无人环境时无线电波传输图

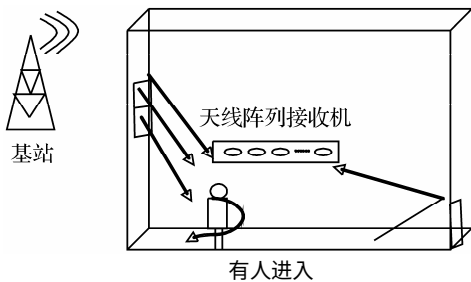


图 2 人进入室内时无线电波传输图

图 3 给出了本系统实验装置基本配置示意图, 通过天线阵列接收 VHF-FM 微波, 接收到的数据经接收机检测、处理, 再通过 A/D 变换, 交给 PC 处理. 另外该装置还配备了数字摄像头以便对分析得出的图像数据作定时记录.

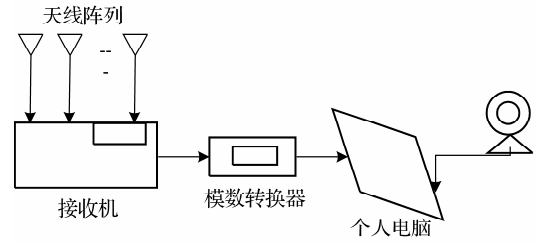


图 3 本系统实验装置

2 数据应用模型

2.1 天线阵列接收信号模型

假设天线阵列元素的个数为 L , 波达方向 (DOA), θ 为垂直面顺时针方向的夹角, 如图 4 所示.

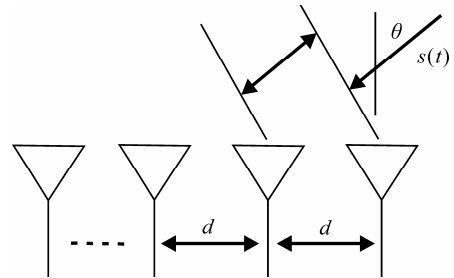


图 4 天线阵列模型

信号源 $s(t)$ 很远, 可以看成是平面波. 噪声 $n(t)$ 均值为 0, 方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(AWGN), 于是接收信号 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = a(\theta)s(t) + n(t), \quad (1)$$

其中: $a(\theta)$ 可看成是由 DOA 构成的矢量, $a(\theta)$ 中的每个元素表示源信号在每根天线上相对于第一根天线的相位偏移, 可表示为:

$$a(\theta) = [1, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(L-1)d\sin\theta}]^T,$$

其中: λ 表示波长, 实际中由于信号的反射、衍射等现象, 接收的信号是由多个 DOA 组成, 所以将 (1) 式重新表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^M \alpha_i a(\theta_i) s(t) + n(t) = a's(t) + n(t),$$

其中: M 表示接收到的总的路径信号, α_i 表示第 i 条路径信号衰减因子, 对于直射来的第一条路径的信号 $\alpha_1 = 1$, a' 表示由不同 DOA 构成的方向矩阵.

下面分析接收到信号的相关性, 收到信号的相关矩阵定义为:

$$R_{xx} = E[x(t)x(t)^H], \quad (2)$$

其中: $E[\bullet]$ 表示整体平均, $[\bullet]^H$ 为共轭转置. 一般

情况下, 噪声与数据信号是不相关的, 即它们的期望值为 0, 因此可以做如下简化:

$$\begin{aligned} R_{xx} &= E[a's(t)s(t)^H a'^H] + E[a's(t)n(t)^H] + \\ &E[n(t)a'^H s(t)^H] + E[n(t)n(t)^H] = \\ &E[a's(t)s(t)^H a'^H] + E[n(t)n(t)^H] = \\ &a'Sa'^H + \delta^2 I, \end{aligned}$$

式中: $S = E[s(t)s(t)^H]$, I 为单位矩阵, 且假设噪声中的每个元素是独立的, $E[n(t)n(t)^H] = \delta^2 I$. 但是实际中 R_{xx} 是无法按照(2)式得到, 考虑到信号的各项历史特性, 可以用时间平均代替统计平均, 则相关矩阵的估计值可以表示为:

$$\hat{R} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} x(t_k)x(t_k)^H,$$

式中: N_s 为采样拍数的个数, N_s 越大, 估计性能越好. 实际从理论分析上很容易得出 $\hat{R}$ 是 R_{xx} 的无偏估计, 本研究中将 $\hat{R}$ 看成 R_{xx} .

2.2 子空间方法分析

子空间方法是基于特征值特征向量, 通过对相关矩阵的特征值对角分解(EVD), 最终将相关矩阵得到的特征值或特征向量分为信号空间和噪声空间.

将相关矩阵 R_{xx} 做 EVD 分解:

$$R_{xx} = a'Sa'^H + \delta^2 I = \sum_{i=1}^L \lambda_i v_i v_i^H = V \Lambda V^H,$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_L\}, \Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L\},$$

其中: λ_i 和 v_i 是相应的特征值特征向量, 且满足下面等式:

$$R_{xx} v_i = (a'Sa'^H + \delta^2 I) v_i = \lambda_i v_i,$$

其中: $i = 1, 2, \dots, L$.

因为 R_{xx} 是正定的厄米特矩阵, 所以 λ_i 是非负实数, 不妨假设 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L > 0$, 于是有:

$$a'Sa'^H v_i = (\lambda_i - \delta^2) v_i, \quad (3)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, L$.

$$\text{令 } \lambda'_i = \lambda_i - \delta^2, \quad i = 1, 2, \dots, L.$$

由于信号源的个数为 1, 从理论上分析知 $\text{rank}[a'Sa'^H] = 1, \lambda'_1 > \lambda'_2 = \dots = \lambda'_L = 0$, 所以相关矩阵 R_{xx} 的特征值关系为:

$$\lambda_1 > \lambda_2 = \dots = \lambda_L = \delta^2. \quad (4)$$

因而特征值矩阵被分解为信号特征值与噪声特征值, 以上分析是在理想情况下得到, 在实际中,

由于用 $\hat{R}$ 代替 R_{xx} , 所以必然会存在误差.

由(3)式和(4)式还可以得到:

$$a'Sa'^H v_i = 0, \quad i = 2, 3, \dots, L,$$

或者

$$a'^H v_i = 0, \quad i = 2, 3, \dots, L.$$

因此, 特征向量组成的矩阵被分解成正交的信号空间与噪声空间, 且由(3)式知第一个特征向量 v_1 是线性于 a' .

3 事件探测方法

基于信号子空间特征向量的室内探测方法, 下面定义函数:

$$P = |v_{\text{old}}^H v_{\text{new}}|,$$

其中: v_{old} 表示在某一时刻, 由 N_s 个连续采样数据经信号处理得到的信号子空间矩阵中的第一个特征向量, v_{new} 为下一时刻相隔间隔 0.1~1.0 ms 内 N_s 个连续采样数据经信号处理得到的信号子空间矩阵中的第一个特征向量 (v_{old} 和 v_{new} 已归一化). 由于在静态无人环境下 v_{old} 与 v_{new} 在间隔小的时间内具有很强的相关性, 所以 P 值接近 1, 但当有人进入室内时, v_{old} 与 v_{new} 的相关性变弱, P 值明显小于 1, 因此通过设置一个合理的探测门限 P_{th} , 可区分有人与无人室内环境. 其中探测门限满足: $P_{\text{event}} < P_{\text{th}} < 1$, 一般可选取 $P_{\text{th}} = (\overline{P_{\text{event}}} + 1) / 2$, P_{event} 为人进入室内时各时刻对应的 P 值, $\overline{P_{\text{event}}}$ 为处理器存储的前 50~100 个 P_{event} 的平均值.

4 实验结果分析

实验中将多个相同的调频接收机组成的天线阵列接收机实验装置, 置于 8 m × 10 m 的办公室靠门窗位置, 天线阵列数为 8, 采样率为 1 MHz, 采样拍数为 10000, 采样相隔时间为 1 ms, 频率点为 106.1 MHz.

图 5 为人体进入室内时, 信号子空间特征向量的映射代价值 P 在 0~5 s 内随时间变化的示意图. 从图 5 中可以看出, 在静态无人环境下, P 值非常接近 1, 这是由于在间隔小的时间内相邻的 2 个信号子空间特征向量具有很强的相关性, 同时可以看出 P 值的波动很小, 因而它不易受到噪声环境的影响. 当人进入室内, 在 0.2~0.6 s 时间内, P 值明显

下降, 说明探测到人体的存在, 1~5 s 时间内, 人在室内的走动使得 P 值有较明显的起伏变化. 如果设定的探测门限 P_{th} 为 0.90~0.95, 则能够很准确地探测到人体的存在.

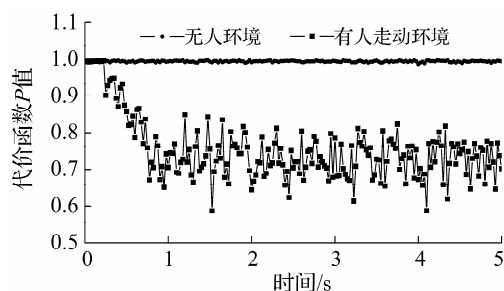


图5 室内无人环境及环境改变时 P 值随时间变化

5 结论

本研究提出了基于 VHF-FM 微波段的室内人体探测方法, 通过对多天线接收机接收到的信号进行采样, 并对数据作相关处理, 得到信号子空间特征向量, 将信号子空间特征向量映射为相应的代价值, 通过比较代价值与探测门限进行室内探测. 由于信号与噪声一般是独立的, 因此接收到的数据经过相关处理后能得到信号子空间特征向量与噪声子空间特征向量, 这样在静态无人环境下, 信号子空间特征向量的获得几乎不受噪声的影响, 所以能够很好地区分室内静态无人环境和动态有人环境, 且具有稳定和准确的探测性能. 另外, 由于信号子空间特征向量的获得与接收机天线阵列

元素的个数、采样拍数、采样间隔时间等有关, 这些因素直接影响着该方法的性能. 为此针对该方法的阵列接收机的系统设计、参数的选取有待进一步研究.

参考文献:

- [1] Zheng Xiaoshi, Zhao Yanling, Liu Guangqi, et al. Review of intelligent video surveillance technology research[C]// International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information, 2011:230-233.
- [2] 范金刚. 智能视频监控系统若干关键技术的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [3] 赵江. 红外探测技术的现状与发展趋势[J]. 舰船电子工程, 2007, 27(1):32-36.
- [4] 林武文, 徐锦, 徐世录. 红外探测技术的发展[J]. 激光与红外, 2006, 36(9):840-843.
- [5] 张睿, 高岭, 谢化力. 多普勒微波入侵报警探测技术现状及发展方向[J]. 中国安防, 2009(7):42-44.
- [6] Terasaka K, Higashikaturagi K, Matsunami I, et al. Human body detection using UWB-IR indoor channel [C]//IEEE 18th International Symposium, 2007:1-5.
- [7] Hatami A, Pahlavan K. In-building intruder detection for WLAN access[C]//Position Location and Navigation Symposium, 2004:592-597.
- [8] Nishi M, Kawaguchi T, Takahashi S, et al. Human detection system using UHF band terrestrial TV receiving waves[C]//Proceedings of the 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2006: 3097-3100.

Indoor Human Detection Based on VHF-FM Microwaves

WANG Zhao, LI You-ming*, ZHU Xing

(Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: This paper presents an indoor human method based on VHF-FM microwaves. The method of detection is developed from the cost value which can be mapped by the corresponding eigenvectors. The eigenvectors are obtained using the space-time correlated processing data received by the antenna arrays. In a static state, the cost value remains almost constant, but it will change significantly when the indoor environment changes caused by people entering. The experimental results show that proposed method can well distinguish the indoor static-dynamic state change with good stability, accuracy and robustness.

Key words: VHF-FM; indoor human detection; antenna arrays; eigenvectors

(责任编辑 史小丽)