



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108564962 B

(45) 授权公告日 2021.10.08

(21) 申请号 201810195198.1

CN 107103911 A, 2017.08.29

(22) 申请日 2018.03.09

CN 105679322 A, 2016.06.15

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 105453174 A, 2016.03.30

申请公布号 CN 108564962 A

CN 102625946 A, 2012.08.01

(43) 申请公布日 2018.09.21

US 2015365159 A1, 2015.12.17

(73) 专利权人 浙江大学

US 2015318000 A1, 2015.11.05

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

WO 2017149124 A1, 2017.09.08

US 2012215529 A1, 2012.08.23

(72) 发明人 陈积明 吴泽先 史治国 常先宇
杨超群 史秀纺 吴均峰

Yusuke Hioka. SPEECH ENHANCEMENT USING A MICROPHONE ARRAY MOUNTED ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE.《IEEE Xplore》.2016,第1-5页.

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司 33200

孙昊.基于声达时间差的移动机器人声源目标定位方法研究.《万方数据库》.2014,全文.

代理人 刘静 邱启旺

Xueliang Zhang等.A SPEECH ENHANCEMENT ALGORITHM BY ITERATING SINGLE- AND MULTI-MICROPHONE PROCESSING AND ITS APPLICATION TO ROBUST ASR.《ICASSP 2017》.2017,第276-280页.

(51) Int. Cl.

G10L 21/0208 (2013.01)

G10L 21/0216 (2013.01)

(56) 对比文件

CN 206841728 U, 2018.01.05

审查员 周家行

权利要求书2页 说明书5页 附图4页

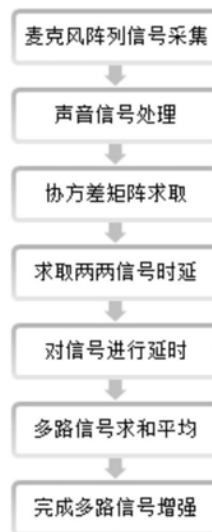
(54) 发明名称

基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法

较高的价值。

(57) 摘要

本发明公开了一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法。该方法通过最小方差无失真滤波(MVDR)的方法和无人机声音信号的特征频率大致估计无人机的方向,利用阵列信号处理,反推出麦克风之间的时延,然后,在时域上对原始信号通过波束形成进行延迟求和处理,将多路信号延迟加权到同一时间节点,最终得到一组信号,实现无人机声音信号增强的效果。同时,在四面体每个阵元都采用上述处理,将四面体所有麦克风的信号都进行了增强。本发明充分利用四面体每个麦克风的信息进行信号增强,最后得到与接收信号相同数量的增强信号,极大地提高接收信号的信噪比,对声阵列处理领域具有



1. 一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 将四面体麦克风阵列采集到的无人机声音信号进行傅里叶变换:

$$F_x(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

其中 $x(t)$ 表示 t 时刻四面体麦克风阵列中每个位于顶点的麦克风接收到的声音信号, $F_x(j\omega)$ 表示傅里叶变换后的声音信号;

(2) 取步骤(1)得到的 $F_x(j\omega)$ 中100Hz-1000Hz之间的谐波的模值形成一个行向量作为采集信号的特征向量,两两麦克风一对,形成6个特征向量矩阵 X_j ;

(3) 分别计算矩阵 X_j 中160-250Hz,320-480Hz,500-750Hz三个频率段对应的声音信号的协方差矩阵:

$$R_{xxi} = E(xx^H)$$

其中 x 为矩阵 X_j 中相应频率段对应的子矩阵, i 为对应的频率段, $i=1,2,3$, E 为对矩阵求期望,右上标 H 代表对矩阵共轭转置;

(4) 根据MVDR方法,利用下述公式计算一对麦克风接收到的声音信号对应的功率谱 P :

$$P = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 (a^H R_{xxi}^{-1} a)}$$

功率谱 P 峰值上对应的方向为声音信号入射到该对麦克风的信号方向,其中 a 为:

$$a = e^{j2\pi f_i d \sin \theta / c}$$

其中 $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$;无人机声音信号各个谐波的中心频率 $f_i = 200, 400, 600$, $i=1,2,3$; c

为声速; d 为两个麦克风之间的间距;

(5) 利用步骤(4)得到的6个信号方向以及两两麦克风之间的间距 d 反推出两个麦克风之间的时延;一个四面体麦克风阵列有四个麦克风,每个麦克风均利用另外三个麦克风的信号进行信号延迟求和波束形成,得到四组增强声音信号 $Z_{DSi}(t)$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法,其特征在于,所述步骤(5)中,利用下列公式反推出时延 τ :

$$\tau = \frac{d \sin \varphi}{c}$$

其中 φ 代表信号方向, c 代表声速, d 为两个麦克风之间的间距。

3. 根据权利要求1所述的一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法,其特征在于,所述步骤(5)中,基于时延做时域延迟求和波束形成的公式如下:

$$Z_{DSi}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x_n(t - \tau_{ni})]$$

其中 N 代表每个四面体麦克风阵列的麦克风数量, $y_n(t)$ 代表延迟后的声音信号, $Z_{DSi}(t)$ 代表第 i 个麦克风最终得到的增强信号, τ_{ni} 表示声源到达第 i 个麦克风和第 n 个麦克风之间

的时延, x_n 为第 n 个麦克风接收到的原始声音信号。

4. 根据权利要求1所述的一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法, 其特征在于, 基于无人机特征频率, 根据无人机三次谐波160-250Hz, 320-480Hz, 500-750Hz构造出三个不同的协方差矩阵, 在MVDR的功率谱计算公式P的分母中将基于三个不同的协方差矩阵的计算结果叠加。

5. 根据权利要求1所述的一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法, 其特征在于, 所述步骤(5)中, 四面体麦克风阵列的每个麦克风均利用另外三个麦克风的信号进行信号延迟求和波束形成, 得到四组 $Z_{DSi}(t)$ 。

基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法

技术领域

[0001] 本发明涉及阵列信号增强领域,特别是涉及四面体麦克风阵列信号处理和延迟求和波束形成。

背景技术

[0002] 本发明的背景基于实际需要产生。近年来,在无人机迅速成为研究热点时,也带来一系列问题,比如无人机黑飞,严重影响区域安全。因此无人机防御正在成为各国政府和军方重点关注的新领域。无人机的声音具有明显的特征,可以有效侦别出空中飞行的物体。通过架设多个麦克风阵列,能有效地收集到无人机的信号,但是实际环境存在的噪声、信号在电路设备传输过程中的噪声以及一些其他的混响、多径干扰等,收集到的声音信号非常嘈杂。因此需要声音信号增强技术增强无人机声音信号,以方便对无人机声音信号进行分析。

[0003] 在目前的研究内容中,多依赖于利用先验进行信号修正的方法来提高声音信号分析的正确率,但这种方法关键在于先验知识的提取,一旦上一时刻的数据出现错误,整个后续信号的分析都将出现重大错误,因此,急需一种新的方法来真正的提升有效信号的信噪比,同时能够保证较快的运行速度和系统较低的成本。而本发明能有效的提高期望信号的强度,从而提升后续对信号分析的准确性。

发明内容

[0004] 为了实现对无人机声音信号的增强,本发明采用四面体麦克风阵列传感器对空中无人机声音信号进行处理,可以有效对移动中的无人机声音信号进行增强。

[0005] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法,包括如下步骤:

[0006] (1) 将四面体麦克风阵列采集到的无人机声音信号进行傅里叶变换:

$$[0007] \quad F_x(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

[0008] 其中 $x(t)$ 表示 t 时刻四面体麦克风阵列中每个位于顶点的麦克风接收到的声音信号, $F_x(j\omega)$ 表示傅里叶变换后的声音信号;

[0009] (2) 取步骤(1)得到的 $F_x(j\omega)$ 中100Hz-1000Hz之间的谐波的模值形成一个行向量作为采集信号的特征向量,两两麦克风一对,形成6个特征向量矩阵 X_j ;

[0010] (3) 分别计算矩阵 X_j 中160-250Hz,320-480Hz,500-750Hz三个频率段对应的声音信号的协方差矩阵:

$$[0011] \quad R_{xxi} = E(xx^H)$$

[0012] 其中 x 为矩阵 X_j 中相应频率段对应的子矩阵, i 为对应的频率段, $i=1,2,3$, E 为对矩阵求期望,右上标 H 代表对矩阵共轭转置;

[0013] (4) 根据MVDR(最小方差无失真滤波器)方法,利用下述公式计算一对麦克风接收到的声音信号对应的功率谱 P :

$$[0014] \quad P = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 (a^H R_{xxi}^{-1} a)}$$

[0015] 功率谱P峰值上对应的方向为声音信号入射到该对麦克风的信号方向,其中a为:

$$[0016] \quad a = e^{j2\pi f_i d \sin \theta / c}$$

[0017] 其中 $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$; 无人机声音信号各个谐波的中心频率 $f_i = 200, 400, 600$, $s, t: i$

$= 1, 2, 3$; c为声速; d为两个麦克风之间的间距;

[0018] (5) 利用步骤(4)得到的6个信号方向以及两两麦克风之间的间距d反推出两个麦克风之间的时延; 一个四面体麦克风阵列有四个麦克风, 每个麦克风均利用另外三个麦克风的信号进行信号延迟求和波束形成, 得到四组增强声音信号 $Z_{DSi}(t)$ 。

[0019] 进一步地, 所述步骤(5)中, 利用下列公式反推出时延 τ :

$$[0020] \quad \tau = \frac{d \sin \varphi}{c}$$

[0021] 其中 φ 代表信号方向, c代表声速, d为两个麦克风之间的间距。

[0022] 进一步地, 所述步骤(5)中, 基于时延做时域延迟求和波束形成的公式如下:

$$[0023] \quad Z_{DSi}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x_n(t - \tau_{ni})]$$

[0024] 其中N代表每个四面体麦克风阵列的麦克风数量, $y_n(t)$ 代表延迟后的声音信号, $Z_{DSi}(t)$ 代表第i个麦克风最终得到的增强信号, τ_{ni} 表示声源到达第i个麦克风和第n个麦克风之间的时延, x_n 为第n个麦克风接收到的原始声音信号。

[0025] 进一步地, 基于无人机特征频率, 根据无人机三次谐波160-250Hz, 320-480Hz, 500-750Hz构造出三个不同的协方差矩阵, 在MVDR的功率谱计算公式P的分母中将基于三个不同的协方差矩阵的计算结果叠加。

[0026] 进一步地, 所述步骤(5)中, 传统波束形成方法在进行信号增强后多路信号将聚合成为一路信号, 而本发明中四面体麦克风阵列的每个麦克风均利用另外三个麦克风的信号进行信号延迟求和波束形成, 得到四组 $Z_{DSi}(t)$, 在信号增强的同时, 保证了信号数量不减少。

[0027] 本发明提出的基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法, 可以有效地增强无人机声音信号, 具有成本低廉, 增强迅速等特点。相比于其他增强手段, 本发明具有以下优势:

[0028] (1) 最小方差无失真滤波器的方法充分利用无人机特征频率信息, 增加了方法估计的准确性。

[0029] (2) 无人机声音信号增强后, 信号整体的信噪比明显提升。

[0030] (3) 充分利用四面体每个麦克风进行信号增强, 最后得到与接收信号相同数量的增强信号, 有利于后续精准定位等算法的实施。

[0031] (4) 算法简便易行, 实时性好, 易实现。

附图说明

- [0032] 图1为本发明方法流程图；
 [0033] 图2为空中运动无人机的时频图表现；
 [0034] 图3为无人机声音信号增强后的时频图表现；
 [0035] 图4为MVDR方向估计实验结果对比；
 [0036] 图5为四面体阵列原理图；
 [0037] 图6为原始信号定位效果展示；
 [0038] 图7为增强信号定位效果展示。

具体实施方式

- [0039] 以下结合附图和具体实施例对本发明作进一步详细说明。
 [0040] 本发明提供了一种基于四面体麦克风阵列的无人机声音信号增强方法,包括如下步骤:
 [0041] (1) 将四面体麦克风阵列采集到的无人机声音信号进行傅里叶变换:

$$[0042] \quad F_x(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

[0043] 其中 $x(t)$ 表示 t 时刻四面体麦克风阵列中每个位于顶点的麦克风接收到的声音信号, $F_x(j\omega)$ 表示傅里叶变换后的声音信号;

[0044] (2) 无人机飞行时会产生一个基频谐波和一系列基频整数倍频率的谐波,而步骤(1)中得到的 $F_x(j\omega)$ 是一个复数向量,取步骤(1)得到的 $F_x(j\omega)$ 中100Hz-1000Hz之间的谐波的模值形成一个行向量作为采集信号的特征向量,用于无人机目标方向估计,两两麦克风一对,形成6个特征向量矩阵 X_j ;

[0045] (3) 分别计算矩阵 X_j 中160-250Hz,320-480Hz,500-750Hz三个频率段对应的声音信号的协方差矩阵:

$$[0046] \quad R_{xxi} = E(x x^H)$$

[0047] 其中 x 为矩阵 X_j 中相应频率段对应的子矩阵, i 为对应的频率段, $i=1,2,3$, E 为对矩阵求期望,右上标 H 代表对矩阵共轭转置;如160Hz-250Hz的谐波组成 2×90 的矩阵;

[0048] (4) 根据MVDR(最小方差无失真滤波器)方法,利用下述公式计算一对麦克风接收到的声音信号对应的功率谱 P :

$$[0049] \quad P = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 (a^H R_{xxi}^{-1} a)}$$

[0050] 功率谱 P 峰值上对应的方向为声音信号入射到该对麦克风的信号方向,其中 a 为:

$$[0051] \quad a = e^{j2\pi f_i d \sin \theta / c}$$

[0052] 其中 $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$;无人机声音信号各个谐波的中心频率 $f_i = 200, 400, 600, \dots, st:i = 1, 2, 3$; c 为声速; d 为两个麦克风之间的间距;

[0053] (5) 利用步骤(4)得到的6个信号方向以及两两麦克风之间的间距 d 反推出两个麦

克风之间的时延 τ ,公式如下:

$$[0054] \quad \tau = \frac{d \sin \varphi}{c}$$

[0055] 其中 φ 代表信号方向, c 代表声速, d 为两个麦克风之间的间距。

[0056] 一个四面体麦克风阵列有四个麦克风,每个麦克风均利用另外三个麦克风的信号进行信号延迟求和波束形成,得到四组增强声音信号 $Z_{DSi}(t)$,公式如下:

$$[0057] \quad Z_{DSi}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x_n(t - \tau_{ni})]$$

[0058] 其中 N 代表每个四面体麦克风阵列的麦克风数量, $y_n(t)$ 代表延迟后的声音信号, $Z_{DSi}(t)$ 代表第 i 个麦克风最终得到的增强信号, τ_{ni} 表示声源到达第 i 个麦克风和第 n 个麦克风之间的时延, x_n 为第 n 个麦克风接收到的原始声音信号。

[0059] 附图1是一个实施例的实施流程图,首先由麦克风阵列采集声音信号,每采集一秒钟的数据,实时通过无人机的特征频率求取协方差矩阵,再利用MVDR(最小无失真滤波器方法)方法来测向。MVDR方法的思想可以表述为在保证期望信号上的输出功率一定的情况下,尽量减少其它方向上的功率(等价于使得总的输出功率最小),在这种情况下得出的功率 P 应该会有更“尖”的峰值,这个峰值就是信号的方向。有了信号的来源方向,反推出时延 τ ,时延求取后,在信号上进行时域上的延时,时域的时延通过采样点进行延时,每个采样点代表 $\frac{1}{fs}$ (s)的时间长度, fs 为采样频率,需要延时的采样点数可以通过公式 $N = \tau fs$ 来计算,完成

延时后信号相加平均来进行信号增强。

[0060] 附图2是在空中运动的无人机原始信号时频分析结果,从黑框处可以看到实验采用的大疆-精灵3无人机的某次谐波。图上颜色的深度反映了信号强度的大小,信号越强,颜色越偏向白色。

[0061] 附图3是无人机声音信号增强后的信号时频分析结果,明显看出,对比图2中的黑框里图像颜色的深度,图3出现了许多深色的条状线段,这个线段就代表在无人机基频以及谐波处都出现了明显的信号增强。

[0062] 附图4展示了角度估计的实际效果,无人机在阵列前随意飞行,与阵列的夹角从正到负依次变化;从图中看到,该方法能够较好地估计出无人机的角度,只有略微的估计噪点,可以采用卡尔曼滤波的方法将这种噪点滤去。图中纵轴为角度,横轴为估计次数。角度基本估计正确。

[0063] 附图5展示了采用四面体阵搭建的麦克风阵列,四面体阵列大大缩小了线性阵列所占用的空间,且可以为后续计算无人机的定位提供方便,线阵只能确定一个平面上的信号方向,而四面体阵的四个麦克风可以确定多个平面的信号的方向。

[0064] 附图6是信号增强前原始信号利用互相关算法和四面体阵列信息来定位无人机得到的效果,图中反应的是无人机的飞行轨迹。不进行增强的信号直接定位的效果十分的差,出现许多噪点。

[0065] 附图7是信号增强后的无人机定位效果,除了少数噪点,在百米级范围内都能比较准确的得到无人机的位置。假设两个四面体麦克风阵列8个麦克风的三维坐标为 $S_n(x_n,$

$y_n, z_n)$, $n=1, 2 \cdots 8$, 且空间只存在一架无人机, 其坐标为 $S_0(x_0, y_0, z_0)$, 无人机到任意两个麦克风之间的距离差为 d_{mn} , $m=1, 2 \cdots 8, n=1, 2 \cdots 8$ 且 $m \neq n$, 无人机距离任意一个麦克风的距离为 d_{i0} , $i=1, 2 \cdots 8$, 以麦克风 1, 2 为例, 可以写出以下等式:

$$[0066] \quad d_{21} = \left| \|S_2 - S_0\| - \|S_1 - S_0\| \right|$$

[0067] 取平方可得:

$$[0068] \quad d_{21}^2 + \|S_1 - S_0\|^2 + 2d_{21}d_{10} = \|S_2 - S_0\|^2$$

[0069] 化简可得:

$$[0070] \quad d_{21}^2 + S_1^T S_1 - 2S_1^T S_0 + 2d_{21}d_{10} = S_2^T S_2 - 2S_2^T S_0$$

[0071] 即:

$$[0072] \quad 2(S_2^T - S_1^T)S_0 + 2d_{21}d_{10} = S_2^T S_2 - S_1^T S_1 - d_{21}^2$$

[0073] 改写成矩阵的形式为:

$$[0074] \quad \begin{bmatrix} 2(S_2^T - S_1^T) & 2d_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ d_{10} \end{bmatrix} = S_2^T S_2 - S_1^T S_1 - d_{21}^2$$

[0075] 同理可以写出下列等式:

$$[0076] \quad \begin{bmatrix} 2(S_p^T - S_1^T) & 2d_{p1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ d_{10} \end{bmatrix} = S_p^T S_p - S_1^T S_1 - d_{p1}^2$$

$$[0077] \quad \begin{bmatrix} 2(S_q^T - S_5^T) & 2d_{q5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ d_{50} \end{bmatrix} = S_q^T S_q - S_5^T S_5 - d_{q5}^2$$

[0078] 其中 $p=2, 3, 4, q=6, 7, 8$, 将以上 6 个方程合并计算, 即可得到无人机的位置坐标。

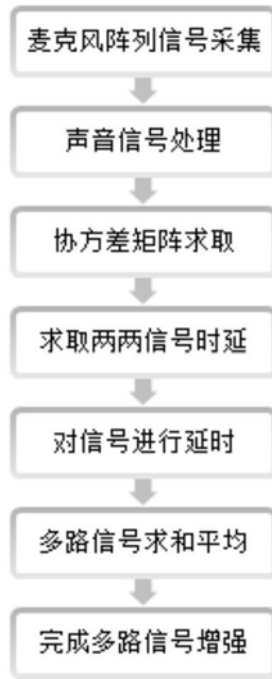


图1

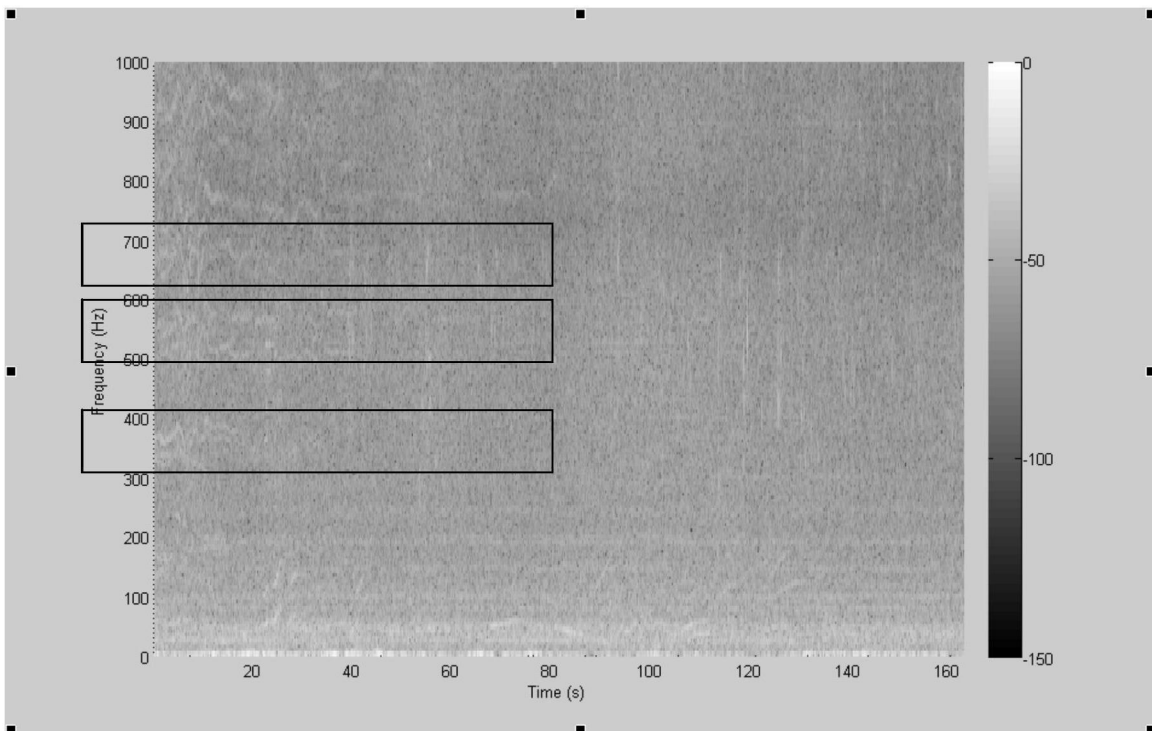


图2

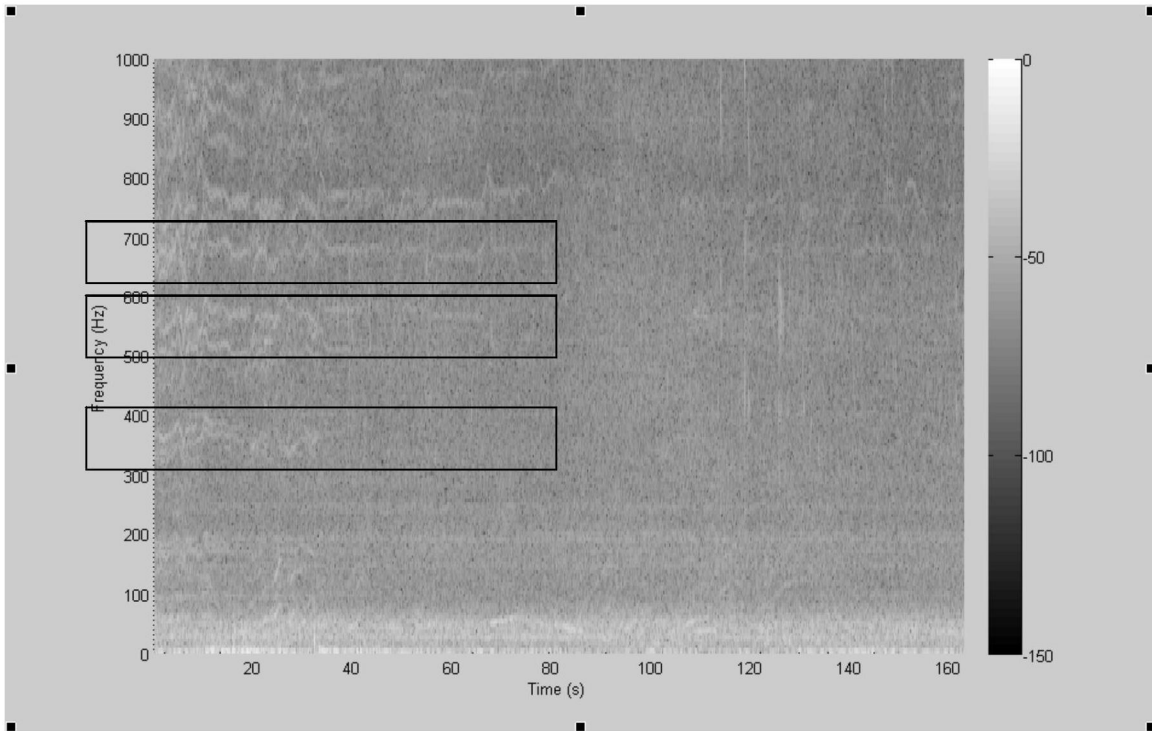


图3

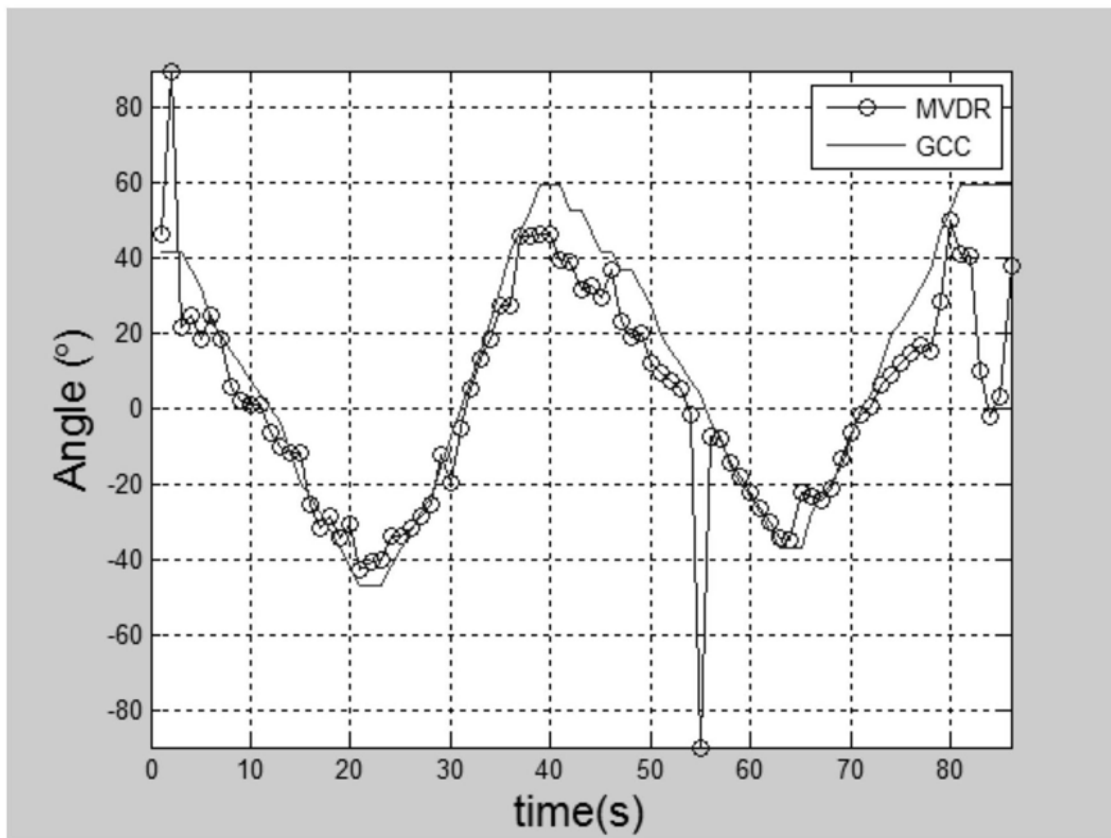


图4

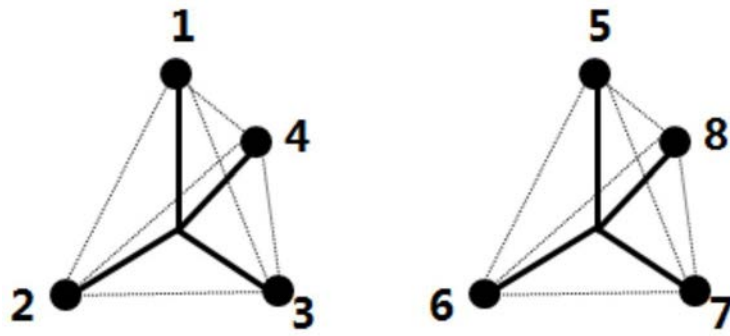


图5

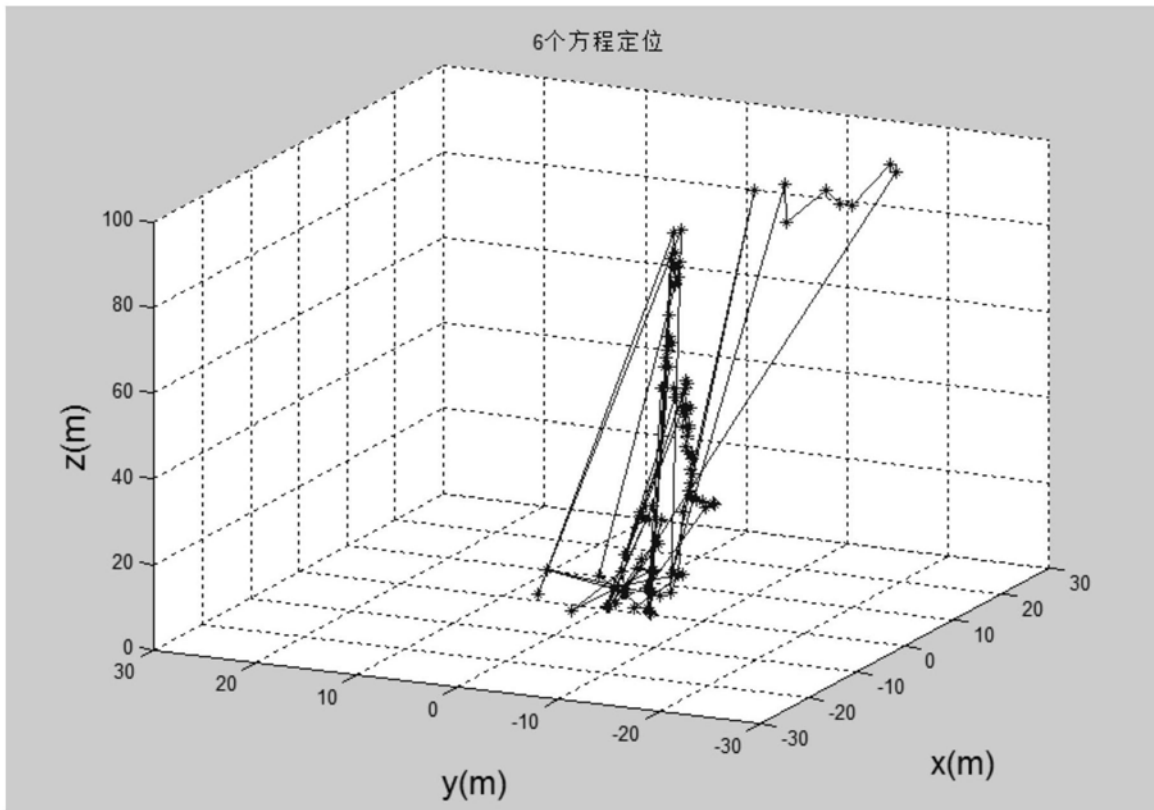


图6

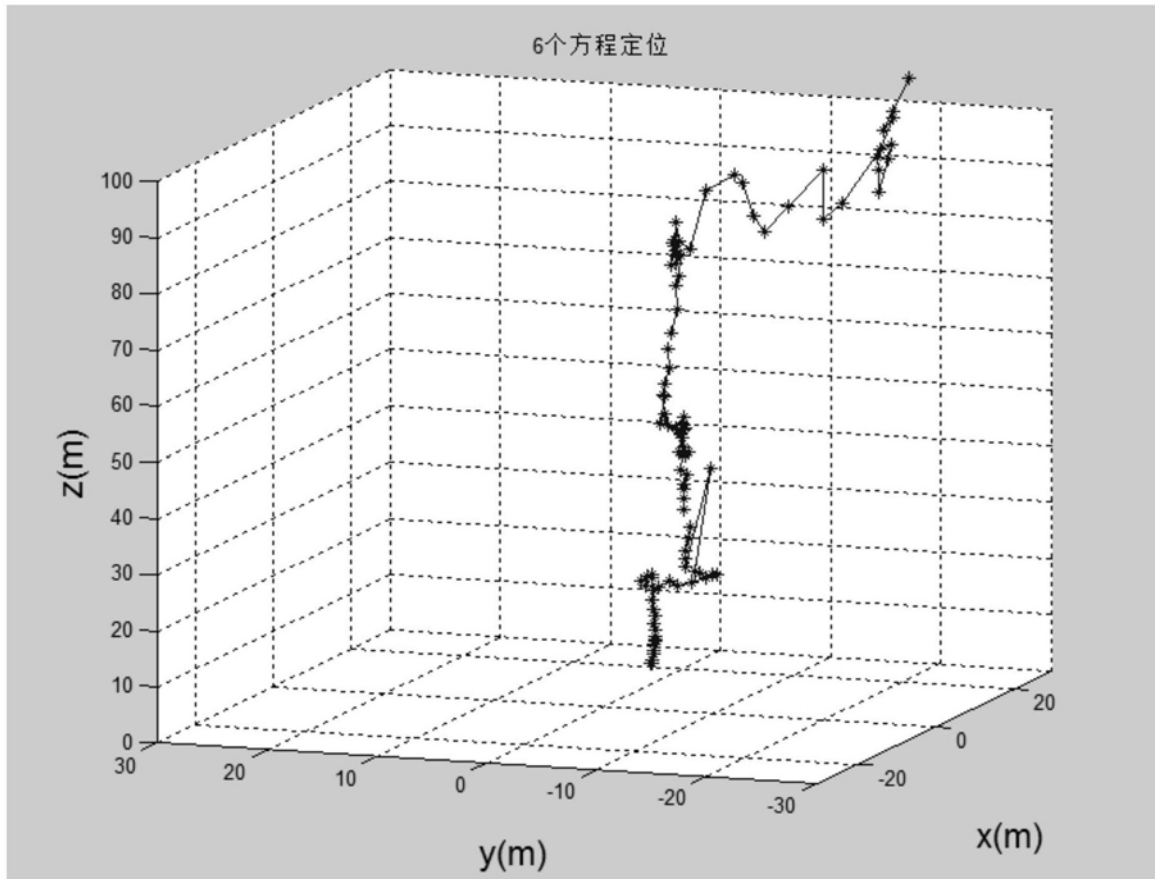


图7