

引用格式:任枫轩,王忠勇.基于ISAR像序列的多旋翼无人机参数估算[J].电光与控制,2018,25(4):55-60. REN F X, WANG Z Y. Parameter estimation of multi-rotor UAVs based on ISAR sequences[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(4):55-60.

基于 ISAR 像序列的多旋翼无人机参数估算

任枫轩¹, 王忠勇²

(1. 河南职业技术学院电气工程系, 郑州 450046; 2. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为了实现对低空多旋翼无人机的旋翼片数及其转动周期参数进行识别,提出了基于逆合成孔径雷达(ISAR)像序列的多旋翼无人机参数估算方法,利用欧拉旋转矩阵对多旋翼无人机运动模型进行建模,并分析了多旋翼无人机ISAR像成像机理,然后利用距离瞬时多普勒算法获取了多旋翼无人机的ISAR像序列,通过成像仿真发现,当旋翼与雷达视向垂直时在成像平面上会出现强散射;再对ISAR像数据进行预处理,获取了强散射在时间-距离向上的分布矩阵,结合蚁群算法估算出了旋翼数目,并用自相关估算出了转动周期。仿真结果表明:提出的算法具有较好的抗噪性,在信噪比大于-10 dB的情况下,实现了对旋翼片数及其转动周期的估算,且旋翼转动周期估算误差小于8%。

关键词: 多旋翼无人机; ISAR像序列; 参数估算; 特征提取; 蚁群算法

中图分类号: TP391.4; TN957.5 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.04.012

Parameter Estimation of Multi-rotor UAVs Based on ISAR Sequences

REN Feng-xuan¹, WANG Zhong-yong²

(1. Department of Electrical Engineering, Henan Polytechnic, Zhengzhou 450046, China;

2. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to identify the number of rotor blades and rotation period parameters of low-altitude multi-rotor UAVs, a method of parameter estimation for multi-rotor UAVs based on ISAR sequences was proposed. Euler rotation matrix was used to build a motion model for multi-rotor UAVs, and the ISAR imaging mechanism of multi-rotor UAVs was analyzed. Then the ISAR sequence of multi-rotor UAVs was obtained by using the range-instantaneous Doppler algorithm. Through the imaging simulation, it was discovered that strong scattering would appear on the imaging surface when the rotor is perpendicular to the radar's visual direction. The ISAR data was pre-processed, and the distribution matrix of strong scattering in the time-range domain was obtained. Then the number of rotor blades was estimated by using the ant colony algorithm, and the rotation period was estimated by autocorrelation. The simulation results show that the proposed method has a good anti-noise performance. The number of rotor blades and the rotation period could be estimated when the SNR was greater than -10 dB, and the estimation error of the rotation period was less than 8%.

Key words: multi-rotor UAV; ISAR sequence; parameter estimation; feature extraction; ant colony algorithm

0 引言

由于多旋翼无人机具有良好的空中悬停特性及易控特性,在航拍、测绘、运输、安保等领域扮演着越来越

重要的角色^[1-3],但由此也引发了许多安全问题。由于质量或操作的原因极有可能在人员密集的区域坠机而引发安全事故,多旋翼携带的可见光、红外、电磁等探测设备也使得隐私越来越容易被窥视,曾发生过无人机黑飞影响航班安全的事件,因此我国于2013年相继推出了民用无人机的空中管理条例,对无人机的航速、重量和飞行高度等都做出了相关要求。由于雷达电磁波受天气影响较小,在目标探测中发挥重要作用,雷达ISAR像为目标散射源在成像平面上的投影表征,

收稿日期:2017-05-25

修回日期:2017-06-12

基金项目:青年科学基金(6170050359);河南省科技厅科技攻关项目(172102210358)

作者简介:任枫轩(1978—),男,河北邯郸人,硕士,副教授,研究方向为信息系统与智能控制。

可以最直观地反映目标的形态,在连续的 ISAR 像中更可以提取出目标的运动参数,为了对空中飞行的无人机进行更准确的识别,本文利用 ISAR 像序列对多旋翼目标进行探测^[4]。目前公开发表的文献中几乎没有对多旋翼无人机特征参数的研究,但在利用 ISAR 像获取目标特征参数方面的研究较多。文献[5]通过仿射配准对 ISAR 像进行横向定标,再通过聚类算法提取强散射源,进而估算了目标长度特征;文献[6]分析了目标在成像平面上不随雷达参数变化的稳定特征量,建立 ISAR 像与结构参数的关系,提出了利用稳定特征量反估结构参数的方法;文献[7]分析了空间目标运动模型及成像机理,推导了强散射源在 ISAR 像平面上的理论分布,并以此来估算特征参数。为此,借助雷达二维像高分辨特征,采用 ISAR 像序列对多旋翼无人机的旋翼片数及转动周期进行识别,通过仿真实验验证了算法的有效性,且具有较低的估算误差。

1 多旋翼无人机运动模型

多旋翼无人机一般由4片以上的旋翼构成,每个旋翼由2片桨叶构成,旋翼轴对称分布且共面,为了对多旋翼无人机运动模型进行建模,首先以旋翼中心为原点,在旋翼旋转平面内任意方向为 x_{rotor1} 轴,旋翼转动角速度矢量方向为 z_{rotor1} 轴,按右手螺旋法则确定 y_{rotor1} 轴,由此建立旋翼坐标系^[8],如图1所示。

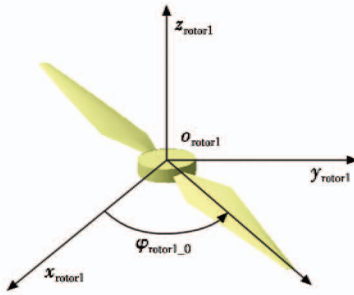


图1 旋翼坐标系

Fig.1 Rotor coordinate system

图1中, φ_{rotor1_0} 为旋翼在旋翼坐标系中的旋转角度,设旋翼旋转角速度为 ω_{rotor1} ,且其初始转角为 $\varphi_{rotor1_init_0}$,则 φ_{rotor1_0} 可表示为: $\varphi_{rotor1_0} = \varphi_{rotor1}t + \varphi_{rotor1_init_0}$ 。对旋翼上任意的散射源位置 r_0 ,在 t 时刻该散射源在旋翼坐标系下的位置 r_1 可表示为

$$r_1 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{rotor1_0} & -\sin \varphi_{rotor1_0} & 0 \\ \sin \varphi_{rotor1_0} & \cos \varphi_{rotor1_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} r_0 \quad (1)$$

由于多旋翼无人机的各个旋翼共面且轴对称分布,所以在建立机体坐标系时以多旋翼无人机的对称轴为 z_{body} 轴,以各旋翼所在平面内任意方向为 x_{body} 轴,

再由右手螺旋定则确定 z_{body} 轴,不失一般性,设桨叶片数为4,由此建立机体坐标系如图2所示。

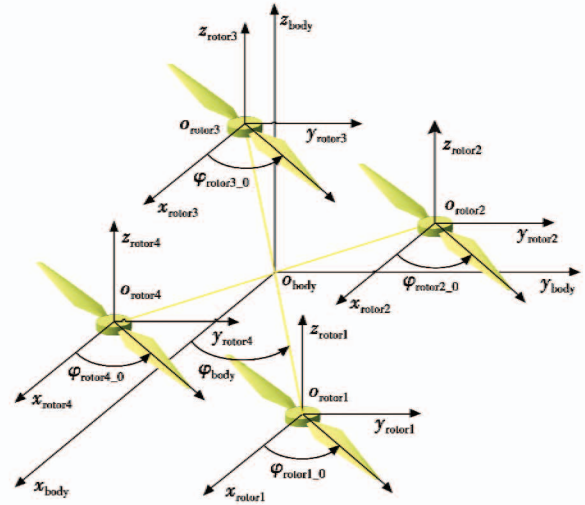


图2 机体坐标系

Fig.2 Coordinate system of the aircraft body

图2中, φ_{body} 为多旋翼无人机在机体坐标系中的转动角度。设桨叶中心到 z_{body} 轴的距离为 l ,桨叶坐标系中的 r_1 在机体坐标系下的坐标 r_2 表示为

$$r_2 = r_1 + [l \cos \varphi_{body} \quad l \sin \varphi_{body} \quad 0] \quad (2)$$

由于多旋翼机体存在俯仰、斜侧和旋转等运动,以机体中心为原点,以垂直于大地表面垂直向上为 z 轴,以过雷达视向与 z 轴构成的平面且垂直于 z 轴的直线为 x 轴,利用右手螺旋定则确定 y 轴^[9], l_{os} 为雷达视向,由此构建本体坐标系如图3所示。

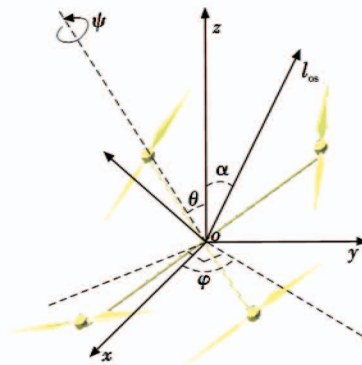


图3 本体坐标系

Fig.3 Ontology coordinate system

不考虑平动运动,多旋翼的任意运动可用欧拉矩阵 R_{coni} 来表示^[10],令 φ 为锥旋角, θ 为章动角, ψ 为自旋角,则欧拉矩阵 $R_{coni}(t)$ 可表示为

$$R_{coni}(t) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

那么旋翼上 r_0 处的散射源在机体坐标系下的坐标 r 可表示为

$$r = R_{\text{coni}} \cdot r_2 \quad (4)$$

2 多旋翼无人机 ISAR 像成像分析

由于多旋翼无人机在空中的运动轨迹复杂,各个旋翼转动速率较快,获取其整个旋转状态下回波的时间较短,即可认为在旋翼完成一周自旋的情况下多旋翼无人机机身相对于雷达视向的位置未变化,其机身自身的微动及桨叶快速旋转都使散射源微多普勒变动且桨叶成像转角积累较大,从而导致利用传统的距离-多普勒成像算法成像时会出现散焦现象,而时频分析技术的出现可以有效地解决由于多普勒时变引起的散焦现象,本文采用距离-瞬时多普勒成像算法完成多旋翼无人机成像^[11]。

2.1 成像机理

设雷达发射线性调频信号,对回波做解线频调处理,通过 FFT 变换得到慢时间频率域的回波信息,忽略剩余视频项和包络斜置项,有^[7]

$$S_{\hat{y}}(t_m, f) = \sum_i A_i \cdot \tau_p \sin c \left(\tau_p \left(f + \frac{2\gamma}{c} l_{\Delta i}(t_m, t) \right) \right) \exp \left(-j \frac{4\pi f_c}{c} l_{\Delta i}(t_m, t) \right) \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 个散射源的电磁散射幅值; τ_p 为脉冲宽度; c 为光速; f_c 为载频; γ 为调频斜率; t_m 为慢时间, $l_{\Delta i}(t_m, \hat{t}) = l_i(t_m, \hat{t}) - l_0$, $l_i(t_m, t)$ 为第 i 个散射源到雷达的径向距离, l_0 为参考距离。可以看出, $|S_{\hat{y}}(t_m, f)|$ 的峰值位于 $f = -2\gamma \cdot l_{\Delta i}(t_m, \hat{t})/c$, 它是第 i 个由散射源在雷达视向上的投影位置 $l_{\Delta i}$ 决定的。通过因子 $-c/(2\mu)$ 进行系数转换, f 可被转化为散射源在雷达视向上的投影距离 $l_{\Delta i}$, 由此可到目标回波的“距离-慢时间像”, 即距离像序列。

再对每个距离单元中的回波进行时频变换, 采用 Gabor 变换对式(5)进行变换^[12], 有

$$\text{power}(t, \omega, l) = \int S_{\hat{y}}(t_m, l) \exp \left(-\frac{(t_m - t)^2}{2\sigma^2} - j\omega t \right) \frac{1}{\pi^{1/4} \sigma^{1/2}} dt_m \quad (6)$$

上式选取特定的成像时间 t , 可获得 t 时刻散射源在雷达视向及多普勒轴上的散射能量分布, 即 ISAR 像, 如果选择连续的成像时间, 则可获得连续的 ISAR 像分布。

2.2 成像仿真实验

设桨叶片数为 4, 桨叶半径为 13 cm, 桨叶中心到机体中心的距离 l 为 0.6 m, 第 1 片旋翼在机体坐标系中的转动角度 φ_{body} 为 30° , 相应的第 2 片到第 4 片旋翼

在机体坐标系中的转动角度为 $120^\circ, 210^\circ, 300^\circ$, 设第 1 片旋翼旋转角速度 ω_{rotor1} 为 10π , 且其初始转角 $\varphi_{\text{rotor1_init}_0}$ 为 0° ; 第 2 片旋翼旋转角速度 ω_{rotor2} 为 10π , 且其初始转角 $\varphi_{\text{rotor2_init}_0}$ 为 120° ; 第 3 片旋翼旋转角速度 ω_{rotor3} 为 10π , 且其初始转角 $\varphi_{\text{rotor3_init}_0}$ 为 250° ; 第 4 片旋翼旋转角速度 ω_{rotor4} 为 10π , 且其初始转角 $\varphi_{\text{rotor4_init}_0}$ 为 330° , 雷达视向与 z 轴之间的夹角 α 为 45° , 机身欧拉角中的锥旋角 φ 为 40° , 章动角 θ 为 20° , 自旋角 ψ 为 30° ; 设雷达带宽为 4 GHz, 起始频率为 8 GHz, 脉冲重复频率 100 kHz, 脉宽 640 μs , 信噪比为 30 dB, 快时间域采样点数为 64, 慢时间域采样点数为 3200, 回波仿真方法采用物理光学法, 对回波数据的距离域及多普勒域进行 10 倍插值后, 提取慢时间域长度为 0.2 s 内的目标回波数据, 将其分成 0.2/25 s 的时间间隔依次提取 ISAR 像, 对多旋翼无人机 ISAR 像进行仿真, 结果如图 4 所示。共得到 25 幅图像, 第 1 行由左向右依次是第 1~5 幅 ISAR 像, 第 2 行由左向右依次是第 6~10 幅 ISAR 像, 依次类推, 且竖向为多普勒轴, 相应的窗长为 $[-781.25 \text{ Hz}, 781.25 \text{ Hz}]$, 横向为距离向轴, 相应的窗长为 $[-1.2 \text{ m}, 1.2 \text{ m}]$ 。

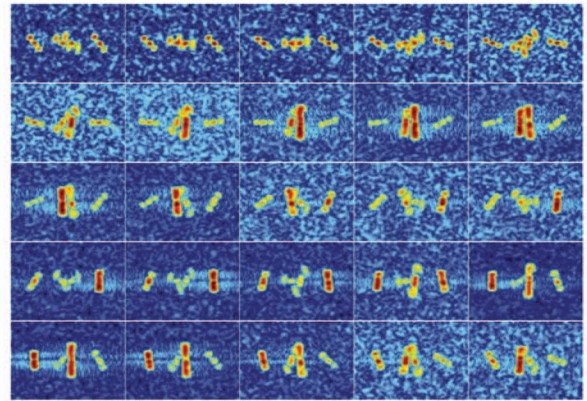


图4 慢时间域成像间隔为 0.2/25 s 的成像结果

Fig.4 Results of slow time domain imaging at a interval of 0.2/25 s

从仿真结果可以发现, 桨叶中心位置始终位于 0 Hz 处, 而从雷达视向看去, 多旋翼各个桨叶的旋转中心并不在一条直线上, 这是由于 ISAR 像横向是由多普勒来决定的, 由于在短时间内假设多旋翼机体运动速度为 0, 所以每个桨叶中心位置处的运动速率为 0, 故在成像平面上桨叶的中心位置处始终位于 0 Hz 处; 同时, 不难发现当雷达视向与桨叶垂直时, 桨叶的散射最强(对应以上各幅 ISAR 像中的粗竖线), 且桨叶散射最强时, 各桨叶在多普勒轴上的分布长度是不同的, 这是由于各个桨叶的转动速度不同引起的多普勒分布不同, 如果对各个桨叶分别进行横向定标, 那么获取的各

个桨叶的尺寸是相同的。

3 旋翼数量及各桨叶转速估算

当雷达视向与桨叶垂直时会出现强散射,由此可以提取旋翼数量及桨叶转速。对 ISAR 像数据进行预处理,得到强散射在时间-距离向上的分布,再从中提取特征参数。

3.1 数据预处理

利用人眼观测连续的 ISAR 像序列可以直接获取桨叶片数,本文要实现桨叶片数的参数化估算,当桨叶垂直于雷达视向时,桨叶散射最强,设此时对应的时间序列为 i ,将对应的 ISAR 像强度分布矩阵 I_i 中的元素按距离单元依次求和,得到第 i 个时间序列散射强度沿距离像序列的分布向量 L_i ,即

$$L_i = \text{sum}(I_i) \quad (7)$$

不难发现,向量 L_i 应该在含有桨叶的那几个距离单元中的幅值最高,如果将所有时刻的 L_i 汇总成一个矩阵 L_T ,则

$$L_T = (L_1 L_2 \cdots L_N)_{N \times M} \quad (8)$$

即 L_T 为 $N \times M$ 维的矩阵,其中, N 为时间序列的总数, M 为距离向单元数。将采样时间改为 0.4 s, ISAR 像成像时间间隔改为 0.4/200 s, 获取相应的 L_T 矩阵并绘于图 5 中。

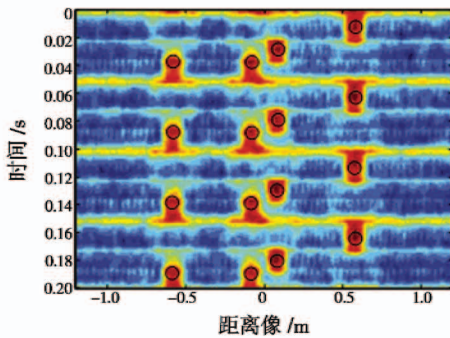


图5 L_T 矩阵分布

Fig. 5 L_T matrix distribution

3.2 特征提取

从图 5 可看出,图中黑色圆圈处均存在极大值点 (r_s, t_s) , 假设极大值点数为 S , s 取值范围为 $1, \dots, S$ 。如果已经提取出黑色圆圈处的极大值点在距离向上的投影 r_s , 那就可以确定桨叶片数, 并可以提取相应的 $L_T(n, r_s/\Delta r)$, 其中, n 为时间序列标号, 取值范围为 $1, \dots, N$, Δr 为距离分辨率, $r_s/\Delta r$ 为相应的距离分辨单元标号。对 $L_T(n, r_s/\Delta r)$ 进行自相关^[13-14] 处理获得的周期的 2 倍, 即该桨叶的转动周期

$$T = 2 * \text{corr}(L_T(n, r_s/\Delta r)) \quad (9)$$

式中, corr 表示做自相关处理获取周期。

由于局部极大值点(图 5 中黑色圆圈的中心)在时间上的投影分量对周期及旋翼片数的提取没有影响, 所以将矩阵 L_T 中每个距离单元中的元素相叠加, 可得向量 $L = (L_1, L_2, \dots, L_m)$, 其中, $L_i = \text{sum}_j(L_T(i, j))$ 。可得到向量 L 的归一化分布如图 6 所示。

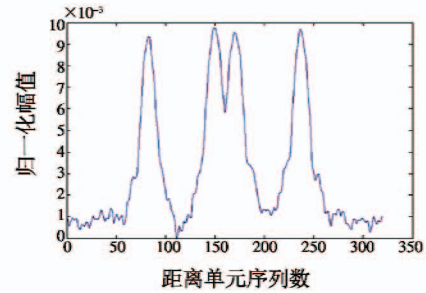


图6 向量 L 的归一化分布

Fig. 6 Normalized distribution of vector L

从图 6 中可以看出, L 是一个多峰值分布的向量, 其峰值个数及峰值位置分别是桨叶片数及桨叶在雷达视向上的位置。为了实现参数化提取, 引入基本的蚁群算法^[15] 提取极大值点位置。但向量 L 中除了桨叶中心的位置处出现峰值外, 在其他峰谷区域内存在许多局部极大值点, 这是由于噪声引起的, 而基本的蚁群算法无法对此进行区分, 可通过设定阈值的方式进行筛选, 不失一般性, 令 $\eta * \max((r_s, t_s), s = 1, \dots, S)$ 为阈值, 其中, η 为筛选系数, 取值范围为 $0 \sim 1$, 由此可以确定桨叶片数及桨叶中心在雷达视向上的投影位置, 再依据前面的方法可以获得桨叶转动周期。

4 仿真结果分析

对旋翼数目及旋翼转动周期进行估算, 需设置的仿真参数有修正系数 η 取 0.8, 基本蚁群算法的仿真参数设置如下: 蚂蚁数量为 1000、蚂蚁移动次数为 50、信息素挥发系数为 0.8、转移概率常数为 0.2、筛选系数为 0.8, 蚁群算法搜索获取的极大值^[16] 结果如图 7 所示。

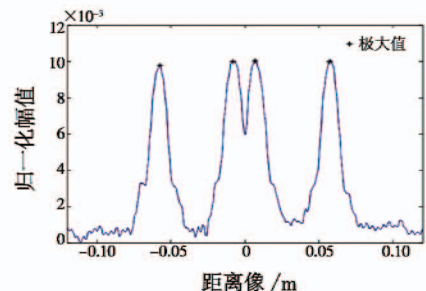


图7 蚁群算法搜索获取的极大值结果

Fig. 7 Maximum results of ant colony algorithm search

图 7 满足条件的极大值共有 4 个, 相应的雷达视向投影分别为 -0.057 m, -0.007 m, 0.007 m, 0.057 m, 提

取矩阵 L_T 中相应距离单元上的向量,分别列于图8中。对图8中的4个向量分别用式(9)中的方法进行周期估算,估得周期分别为0.212 s,0.216 s,0.200 s,0.204 s。相应的误差分别为6%,8%,0%,2%。再考虑雷达视角 α 分别取 $30^\circ, 45^\circ$ 及 60° ,且信噪比分别取 30 dB,20 dB,10 dB,0 dB 的情况,将桨叶片数及桨叶转动周期估算误差列于表1。

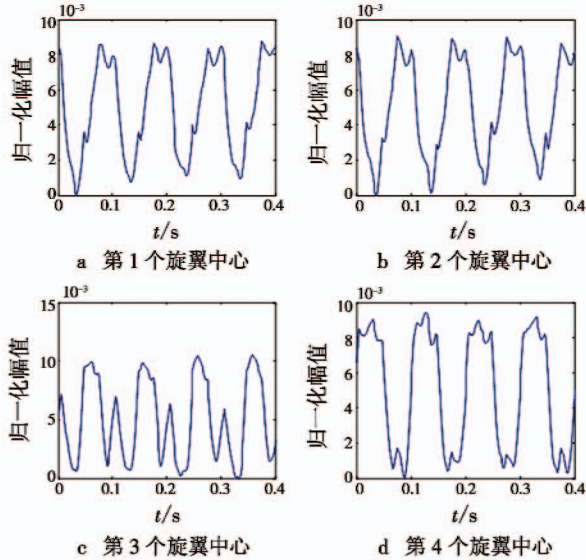


图8 提取的矩阵 L_T 中相应距离单元上的向量分布

Fig.8 Vector distribution on the corresponding distance unit in the extracted matrix L_T

表1 不同雷达视角下的转动周期估算误差及旋翼数

Table 1 Rotation cycle estimation error and rotor number at different radar angles

雷达视角	转动周期	信噪比/dB						
		-30	-20	-10	0	10	20	30
30°	旋翼1周期/%	~	~	2	4	2	2	2
	旋翼2周期/%	~	~	4	2	2	0	0
	旋翼3周期/%	~	~	4	4	4	6	8
	旋翼4周期/%	~	~	2	6	6	6	8
	旋翼片数	5	6	4	4	4	4	4
45°	旋翼1周期/%	~	~	4	4	2	2	6
	旋翼2周期/%	~	~	2	2	2	2	8
	旋翼3周期/%	~	~	4	4	6	8	0
	旋翼4周期/%	~	~	4	4	6	6	2
	旋翼片数	8	5	4	4	4	4	4
60°	旋翼1周期/%	~	~	4	4	2	2	2
	旋翼2周期/%	~	~	2	2	2	2	0
	旋翼3周期/%	~	~	2	4	8	6	8
	旋翼4周期/%	~	~	4	4	6	6	6
	旋翼片数	7	2	4	4	4	4	4

由仿真结果可以看出,在信噪比大于 -10 dB 的情况下,旋翼数目及各旋翼转动周期均可有效估算,并且旋翼转动周期估算误差小于8%;而在信噪比低于 -20 dB 时,由于旋翼数估算错误,致使提取出的周期

与真实值差别较大,所以并未列出此时的周期估算误差。另外,发现表中所有的周期估算误差的百分数都是2的整数倍,这是由于ISAR像采样间隔导致的,本文ISAR像采样间隔为 $0.4/200 = 0.002$ s,那么对提取的时间序列进行自相关处理后的时间分辨率也为0.002 s,由式(9)可知估算的周期分辨率为0.004 s,除以真实周期0.2 s,可得周期估算的百分数分辨率为2。

5 结束语

借助雷达二维像高分辨特征,利用ISAR像序列提取旋翼强散射特征进行参数估算,通过对多旋翼无人机运动模型建模,对多旋翼无人机ISAR像成像机理分析,再利用强散射在时间及雷达视向上的分布,结合蚁群算法及自相关对多旋翼无人机的旋翼片数及其转动周期进行估计。通过仿真实验结果表明:当信噪比大于 -10 dB 时,各个参数估算误差不会超过8%,这说明提出的算法可有效提取相应参数,对飞行的旋翼无人机的探测识别提供了有力的数据支持,为低空安全管理提供保障。

参考文献

- [1] 戴冬,王果,王磊. 博弈论在固定翼无人机地面目标跟踪控制中的应用[J]. 计算机工程,2016,42(7):287-292,298.
- [2] 高扉扉,陈念年,范勇,等. 一种旋翼式无人机的视觉着陆位姿估计方法[J]. 电光与控制,2017,24(2):35-38,80.
- [3] 王庆贺,万刚,曹雪峰,等. 基于数据融合的多旋翼无人机定位控制器设计[J]. 系统仿真学报,2016,28(10):2593-2599.
- [4] 张凌晓,王宝顺,贺思三,等. 基于图像旋转匹配的组网雷达ISAR图像横向定标[J]. 计算机工程与科学,2015,37(4):796-801.
- [5] JIN G H, GAO X Z, DONG Z. Two-dimensional length extraction of ballistic target from ISAR images using a new scaling method by affine registration[J]. Defence Science Journal, 2014, 64(5):458-463.
- [6] 徐少坤,刘记红,袁翔宇,等. 基于ISAR图像的中段目标二维几何特征反演方法[J]. 电子与信息学报,2015,37(2):339-345.
- [7] 束长勇,陈世春,吴洪睿,等. 基于ISAR像序列的锥体目标进动及结构参数估计[J]. 电子与信息学报,2015,37(5):1078-1084.
- [8] 陈丽城,李春涛,张孝伟,等. 无人机地面动力学建模及分析[J]. 计算机仿真,2016,33(6):13-18,35.

- [9] 刘东辉,奚乐乐,孙晓云. 矢量拉力垂直起降无人机姿态纵向控制研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(1): 260-264.
- [10] XU S K, LIU J H, WEI X Z, et al. Wideband electromagnetic characteristics modeling and analysis of missile targets in ballistic midcourse[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(6): 1655-1666.
- [11] 芮力,钱广红,张国庆,等. 基于自适应最优核时频分布理论的 ISAR 成像方法[J]. 电光与控制, 2014, 21(7): 46-50, 102.
- [12] ÖZDEMİR C. Inverse synthetic aperture radar imaging with MATLAB algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012: 274-287.
- [13] 周磊磊,罗炬锋,付耀先,等. 低信噪比下基于自相关函数的频率估计方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2014, 42(4): 45-49.
- [14] 陈刚,王鹏飞,李金玲. 基于自相关函数的模糊时间序列优化算法[J]. 控制与决策, 2015(10): 1797-1802.
- [15] DORIGO M, DI CARO G. Ant colony optimization: a new meta-heuristic[J]. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, 1999. doi: 10.1109/CEC.1999.782657.
- [16] 武光辉,童创明,李西敏,等. 逆合成孔径雷达目标成像识别优化仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(6): 9-12, 339.

(上接第 15 页)

- [2] YANG K S, CHENG C C. Robust adaptive controller design for a quadrotor helicopter[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 284: 2296-2300.
- [3] DYDEK Z T, ANNASWAMY A M, LAVRETSKY E. Adaptive control of quadrotor UAVs: a design trade study with flight evaluations[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1400-1406.
- [4] XIONG J J, ZHENG E H. Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV[J]. ISA Transactions, 2014, 53(3): 725-731.
- [5] 薛劭哲,侯明善,张松. 微型四旋翼飞行器 TSMC 控制方法研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(15): 88-91.
- [6] PATEL A R, PATEL M A, VYAS D R. Modeling and analysis of quadrotor using sliding mode control[C]// Proceeding of the 44th Southeastern Symposium on System Theory, 2012: 111-114.
- [7] 曹开发,谢慕君,李元春. 基于自适应反演滑模的四旋翼飞行器姿态控制研究[J]. 自动化与仪表, 2016, 22(1): 42-47.
- [8] 吴文海,刘锦涛,李静,等. 四旋翼无人机 SO(3) 快速终端滑模姿态控制器设计[J]. 电光与控制, 2015, 22(11): 6-10.
- [9] 杨柳,刘金琨. 基于干扰观测器的四旋翼无人机轨迹跟踪鲁棒控制[J]. 飞行力学, 2015, 33(4): 328-333.
- [10] 吴琛,苏剑波. 四旋翼飞行器的轨迹跟踪抗干扰控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(11): 1422-1430.
- [11] 卜祥伟,吴晓燕,陈永兴,等. 基于非线性干扰观测器的高超声速飞行器滑模反演控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1473-1479.
- [12] 蒲明,吴庆宪,姜长生,等. 高阶滑模微分器的分析与改进[J]. 控制与决策, 2011, 26(8): 1136-1146.
- [13] 李慧洁,蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 498-502.

下 期 要 目

鲁棒自适应控制的靶机蛇形机动控制律设计
 基于 PHD 滤波的箱粒子划分多目标跟踪算法
 基于操稳特性的飞行器包线划分方法
 追逃定性微分对策中界栅的确定
 基于梯度下降法的四旋翼无人机姿态估计系统
 一种基于偏转镜的激光空间合束方法研究
 基于网格连通的航迹自动起始方法
 无人机覆盖搜索地域通信网交叉式航路规划

无人机分布式飞行控制计算机故障诊断研究
 基于几何约束的视觉闭环检测和位姿优化
 一种基于最速下降法的无模型自适应控制
 基于深度卷积神经网络的飞机识别研究
 一种针对海面 SAR 图像的视觉注意模型设计
 基于稀疏表示和拉伸变换的 SAR 图像目标识别
 双目数字图像实时预畸变校正技术研究
 灰度图像的边缘检测