

文章编号: 1672-2892(2010)04-0373-06

## 无人机电太赫兹合成孔径雷达成像分析与仿真

林 华

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 将太赫兹合成孔径雷达与无人机相结合, 详细分析了其技术特点, 重点研究了合成孔径雷达多个典型频段平均功率、理论方位向分辨力、最大距离徙动分量、条带宽度与其他关键参数的关系, 给出了太赫兹合成孔径雷达的适用条件。针对低空无人机电平台、点阵目标, 采用距离多普勒算法进行成像仿真, 取得名义空间分辨力为  $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$  的高分辨力图像。

**关键词:** 合成孔径雷达; 太赫兹; 无人机; 距离徙动; 成像

**中图分类号:** TN958.2

**文献标识码:** A

## Analysis and simulation of UAV terahertz wave synthetic aperture radar imaging

LIN Hua

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The technique features of Unmanned Aerial Vehicles(UAV) terahertz wave Synthetic Aperture Radar(SAR) imaging were analyzed. The relation among average power of radio transmitter, resolution in azimuth, maximum range migration, strip width and other parameters of SAR in typical frequency bands was discussed. For multiple scatter targets, based on the Range-Doppler algorithm, the imaging simulation was conducted to verify some operation characteristics of UAV THz SAR and obtain high resolution radar image( $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ ).

**Key words:** Synthetic Aperture Radar; THz; Unmanned Aerial Vehicle; range migration; imaging

太赫兹(Terahertz,  $1\text{ THz} = 10^{12}\text{ Hz}$ )泛指频率在  $0.1\text{ THz} \sim 10\text{ THz}$  波段内的电磁波, 位于红外和微波之间, 处于宏观电子学向微观光子学的过渡阶段。在 20 世纪 80 年代中期之前, 太赫兹波段两侧的红外和微波技术发展相对比较成熟, 但是人们对太赫兹波段的认识仍然非常有限, 形成了所谓的“THz Gap”。随着一系列新技术、新材料的开发, 特别是超快激光技术的突破, 太赫兹辐射的产生和应用得到蓬勃的发展<sup>[1]</sup>。THz 波在传播、散射、反射、吸收、穿透等方面与毫米波、红外线有着显著不同的特点, 在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、安全检查、反恐探测, 尤其在卫星通信和军用雷达等领域, 具有重大的科学价值和广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

合成孔径雷达成像具有全天时、全天候、远距离、高分辨与宽绘制带的特性, 它可以大大地提高雷达的信息获取能力, 特别是战场感知能力<sup>[4]</sup>。从公开发表的文章来看太赫兹成像的研究集中在时域光谱成像与扫描成像上<sup>[5-7]</sup>, 利用太赫兹辐射进行合成孔径雷达成像的研究非常少<sup>[8]</sup>。利用太赫兹辐射进行合成孔径成像的优点<sup>[9-11]</sup>如下:

- 1) 与相同孔径传统太赫兹成像系统相比, 合成孔径处理可取得更高的分辨力;
- 2) 分辨力是固定的, 而光学方法成像分辨力和一定的聚焦深度有关;
- 3) 合成孔径处理可以获得更高的信噪比。

未来信息战的需求使得无人机(UAV)系统成为当今各国武器装备的发展重点。特别是最近几场高科技局部战争中, 从情报收集和战场监视, 到通信中继、目标引导、直接作战, 无人机以其独有的快速、灵活和持久性渗透到各种作战任务中, 在获取信息的优越性、高作战效能比以及自主式精确打击等方面, 愈加展现出不可或缺性<sup>[12]</sup>, 无人机电合成孔径雷达必将成为未来战争中实现“无伤亡”侦察的重要手段<sup>[13]</sup>。

## 1 太赫兹合成孔径雷达的技术特点

THz 波与微波段相比, 频率更高, 能够探测比微波雷达更小的目标和实现更精确的定位, 具有更高的分辨力和更强的保密性。与光波段相比, 其具有更好的穿透沙尘烟雾的能力, 可以实现全天候的工作且能量效率更高。而且其电子对抗性能相对较强, 有望成为反隐身的军事武器<sup>[3,13-14]</sup>。

无人机要能够实现大机动、高速长航时飞行, 对 SAR 雷达的重量、体积、功耗提出了严格的要求, 而太赫兹雷达在此具有较大的优势。SAR 成像系统追求高分辨力成像, THz 频段更适合于极大带宽信号的产生、处理, 有利于高分辨力成像。下面讨论太赫兹雷达与合成孔径处理相关的技术特点。

### 1.1 体积小, 重量轻, 相同波束宽度方位向分辨力更高

合成孔径雷达径向分辨力取决于信号带宽, 而方位向分辨力取决于天线方位向尺寸, 在相同波束宽度即相同的成像条带宽度时, 几个典型频段的的天线尺寸、方位向分辨力如表1所示。同样波束宽度太赫兹频段天线口径较 Ka,Ku 与 X 波段的的天线口径小几倍, 图像方位向分辨率高几倍。

表1 典型频段天线尺寸与理论方位向分辨力(方位波束宽度:0.5°, 展宽因子:1.4)  
Table1 Cross-range resolution and the diameter of the radar antenna in typical frequency bands

frequency band/GHz	antenna aperture/mm	cross-range resolution/m
10	3 046	2.132
16.67	1 827	1.279
35	870	0.609
94	324	0.227
140	218	0.152
220	138	0.097

### 1.2 成像算法简单, 无须距离徙动校正

距离徙动是合成孔径雷达成像中的一个重要问题, 随着载机的运动, 地面目标与雷达载机间的距离不断变化, 当目标与雷达间的距离变化超过一个距离单元时, 目标回波就散布在相邻的几个距离门内, SAR 回波信号的这种特征称为距离单元徙动(Range Cell Migration, RCM)<sup>[15-16]</sup>。

将雷达与目标瞬时距离  $r(t)$  按泰勒公式展开, 取前 3 项:

$$r(t) \approx r(t)|_{t=t_0} + r'(t)|_{t=t_0} (t-t_0) + \frac{1}{2} r''(t)|_{t=t_0} (t-t_0)^2 \approx r(t)|_{t=t_0} + \frac{\lambda f_{dc}}{2} (t-t_0) - \frac{\lambda f_{dr}}{4} (t-t_0)^2 \quad (1)$$

式中  $r(t)$  与  $r(t)|_{t=t_0}$  的差值是  $t$  时刻相对于  $t_0$  时刻的距离变化量, 也就是距离徙动量。式(1)右边的线性项称为距离走动, 二次项称为距离弯曲, 当 SAR 为机载正侧视时, 多普勒中心频率  $f_{dc}$  为 0, 不存在距离走动问题, 而距离弯曲在任何情况下都存在, 要获得高质量的图像, 必须进行弯曲校正, 如果距离徙动小于一个距离单元, 可以忽略其影响, 简化运算<sup>[16]</sup>。

假设方位向分辨力为 0.15 m, 则理想情况下天线方位向长度为 0.3 m, 对几个典型频段, 图 1(a)给出在正侧视条件下最大距离单元徙动分量与距离的关系曲线。当距离为 2 000 m 时, 太赫兹频段的最大距离单元徙动分量均小于分辨单元的 1/4, 可以忽略其影响, 可以不做距离徙动校正, 直接采用距离多普勒算法。

### 1.3 条带宽度较窄

合成孔径雷达条带宽度与天线尺寸、发射信号入射角、波束宽度、载波频率和飞行器高度等相关, 如式(2)所示:

$$W = H \tan\left(\theta_i + \frac{\beta}{2}\right) - H \tan\left(\theta_i - \frac{\beta}{2}\right) \quad (2)$$

式中:  $W$  为条带宽度;  $\theta_i$  为入射角;  $\beta$  为波束宽度;  $H$  为平台飞行高度。

飞行高度 1 000 m, 方位向分辨力 0.15 m(天线方位向宽度为 214 mm), 条带宽度与入射角的关系如图 1(b)所示。

### 1.4 大气衰减严重, 适合于中、近距成像或外太空应用

合成孔径雷达方程<sup>[17-18]</sup>:

$$P_{av} = \frac{8\pi\lambda R^3 V_s k T_0 F_n}{NE\sigma^0 (D_a D_r)^2 \rho_r} Lk_s 10^{\frac{\alpha_a \cdot 2R}{10 \cdot 1000}} \quad (3)$$

式中： $P_{av}$  为平均发射功率； $\lambda$  为波长； $R$  为距离； $v_s$  为 SAR 平台运动速度； $k$  为波尔兹曼常数； $T_0$  为常温(290 K)， $F_n$  为噪声系数； $NE\sigma^0$  为等效后向散射系数； $D_a$  为天线方位向孔径长度； $D_r$  为天线距离向孔径长度； $\rho_r$  为径向分辨力； $k_s$  为系统损耗因子； $\alpha_a$  为大气衰减因子。

外辐射源的平均功率受噪声等效后向散射系数、径向分辨力，作用距离、速度与天线尺寸等因素的制约，晴朗天气大气衰减如表 2 所示。

假定平台运动速度为 500 m/s,入射角为 15°, 方位向分辨力为 0.15 m, 天线尺寸为 214 mm×214 mm, 平均功率与飞行高度关系曲线如图 1(c), 1(d)所示。在近距离由于太赫兹频段天线增益较高

表 2 在海平面内晴朗大气(水气密度为 7.5 g/m<sup>3</sup>)条件下双向衰减系数<sup>[19]</sup> $k_{a0}$

Table2 Atmospheric attenuation in clear air( $T:20^{\circ}\text{C},\text{H}_2\text{O}:7.5\text{ g/m}^3$ )

centre frequency/GHz	attenuation/dB·km <sup>-1</sup>
1.3	0.013
3.0	0.016
5.5	0.019
10.0	0.028
15.0	0.048
35.0	0.140
95.0	0.620
140.0	1.400
240.0	3.500

有明显优势；随着相对距离增加，由天线增益带来的优势被大气衰减抵消，需要的平均功率迅速攀升。因此太赫兹频段合成孔径雷达适合近距离成像(如近距离无人机)，或大气衰减较小的场合，如外太空应用。

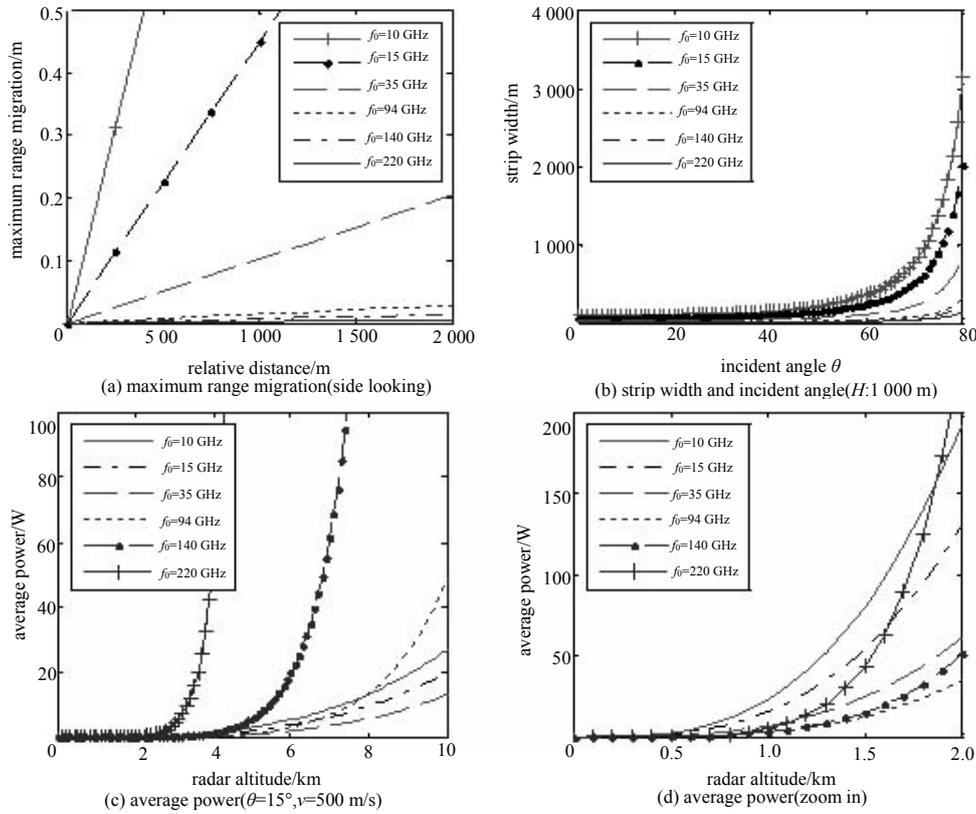


Fig.1 Average power, maximum range migration and strip width

图 1 最大距离徙动、条带宽度与平均功率

1.5 要求高精密度平台运动补偿，算法复杂

SAR 雷达工作原理要求 SAR 雷达相对于成像的地域保持水平、匀速、直线飞行，当 SAR 在中、低空小型无人机平台工作时，由于无人机的机体较小，飞行高度较低，SAR 成像受气流的影响较大。对无人机 SAR 系统进行运动补偿是无人机 SAR 成像的一个关键技术<sup>[20]</sup>，通常利用高精密度的惯导系统和 GPS 定位系统输出的运动参数来控制载机和天线波束进行低频误差校正；从回波原始数据中提取姿态、速度和加速度信息进行高频误差补偿<sup>[18]</sup>。

无人机载太赫兹合成孔径雷达要取得与 X 频段相当的分辨力，合成孔径时间可以小一个数量级，故对航线方向与偏航角误差幅度的要求较低。对俯仰、偏航方向与滚转角误差幅度的要求与 X 频段相当。但是 THz 频段波长短，对高频振动幅度要求苛刻<sup>[3]</sup>，对各种自聚焦算法提出了很高的要求。

1.6 目标棱角效应明显，利于目标外形特性提取

雷达工作频段越高，目标棱角效应就越明显。在 THz 频段，目标几何外形的棱角能产生更强的回波，有利于

获取清晰的目标外形特征图。

### 1.7 THz 频段微多普勒特征明显，有利于慢速运动目标的检测

雷达探测路面、海面和空中运动目标及其上的慢速运动和微振动目标时，主要工作于下视状态，复杂的地/海杂波信号对检测动目标不利。微多普勒特征在 THz 频段比微波频段明显许多，在 THz 频段通过时频分析方法可比较方便地对慢速运动和微振动目标进行检测、识别。

## 2 太赫兹合成孔径雷达成像算法仿真

从原理上讲，SAR 成像处理的过程是从回波数据中提取目标区域散射系数的二维分布，本质上是一个二维相关处理过程，因此最直接的处理方法是对回波进行二维匹配滤波，但其运算量很大，再加上 SAR 的数据率本来就高，这使得实时处理难于实现。距离多普勒算法 (Range-Doppler, RD) 是经典、传统的成像算法，其距离徙动校正是在距离压缩后的 R-D 域中，利用插值实现；二次距离压缩算法 (Second Range Compression, SRC) 是对 RD 算法的改进，提高了分辨力；CS (Chirp Scaling) 算法适合于大斜视角、宽测绘带情况下的 SAR 成像，它在频域乘上相位校正因子来完成距离徙动校正，避免了插值运算；波数域算法 ( $\omega$ -k) 将信号变换到二维频域，利用 STOLT 变换完成距离徙动校正和方位聚焦，是 SAR 二维移变滤波器的最优实现；谱分析算法 (Spectra Analysis, Specan) 将谱估计引入到 SAR 成像处理中，减少了方位处理的运算量，改进了信噪比和分辨力<sup>[15]</sup>。

根据各种算法的运算量、复杂程度，结合前面对太赫兹波段合成孔径雷达最大距离徙动分量的分析，本文采用 R-D 算法对太赫兹合成孔径雷达成像算法仿真。算法流程如图 2 所示，距离 FFT 后随即进行距离向匹配滤波，再利用 IFFT 完成距离压缩；通过方位 FFT 将数据变换至距离多普勒域，在距离多普勒域进行随距离时间及方位频率变化的 RCMC (Range Cell Migration Correction)，将距离徙动曲线拉直到与方位频率轴平行的方向；通过估计多普勒参数，建立方位向参考函数，进行每一个距离门上的频域匹配滤波实现方位压缩；最后通过方位 IFFT 将数据变回时域，得到压缩的复图像<sup>[15-16]</sup>。

仿真中假设的仿真参数如表 3 所示，图 3 是针对上述参数对均匀点阵目标的仿真结果。根据图 1 太赫兹频段无人机载合成孔径雷达最大距离徙动分量的分析结果，针对表 3 设置的仿真参数，其最大距离徙动分量小于分辨单元的 1/4。由图 3(a) 距离向压缩后的数据可见，在针对正侧视假设当前仿真参数下，距离徙动基本是可以忽略的，其成像算法相对较简单，可以不做 RCMC。图 3(b) 是距离向压缩后某方位时间的切片；图 3(c) 是距离向与方位向压缩后的图形；图 3(d) 是其三维图形。仿真取得名义空间分辨力为 0.3 m×0.3 m 的高分辨率图像。

表 3 无人机载太赫兹合成孔径雷达仿真参数  
Table 3 Simulation parameters of UAV terahertz wave SAR

range resolution/m	range resolution/m	carrier frequency/GHz	speed of radar-carrying vehicle/m·s <sup>-1</sup>	radar altitude/m	slant-range to the center of target area/m	lattice distance/m	number of targets
0.3	0.3	140	100	1 000	2 236	3	9

## 3 结论

无人机以其独有的快速、灵活和持久性渗透到各种作战任务中，成为未来战争中实现“无伤亡”侦察的重要手段，太赫兹合成孔径雷达在重量、体积、功耗方面具有较大的优势，更适用于极大带宽信号的产生、处理，更容易实现高空间分辨力成像。在正侧视条件下详细分析了太赫兹合成孔径雷达最大距离单元徙动分量、发射平均功率、条带宽度、运动补偿要求、目标棱角与微多普勒效应和抗干扰特性等技术特点，给出了太赫兹合成孔径雷达的适用条件。针对无人机载平台、点阵目标，采用距离多普勒算法进行成像仿真，取得了高空间分辨力图像。

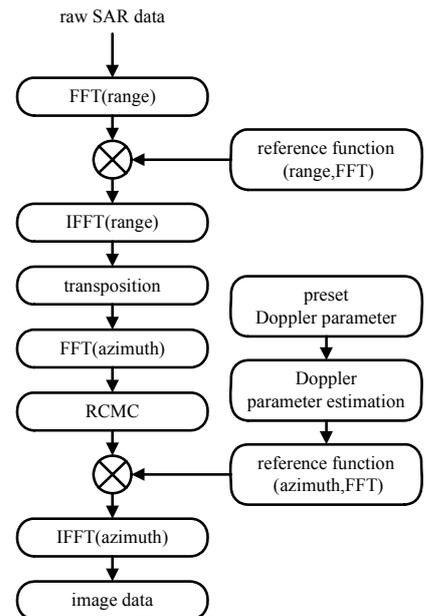


Fig. 2 Range-Doppler imaging algorithm  
图 2 距离多普勒算法

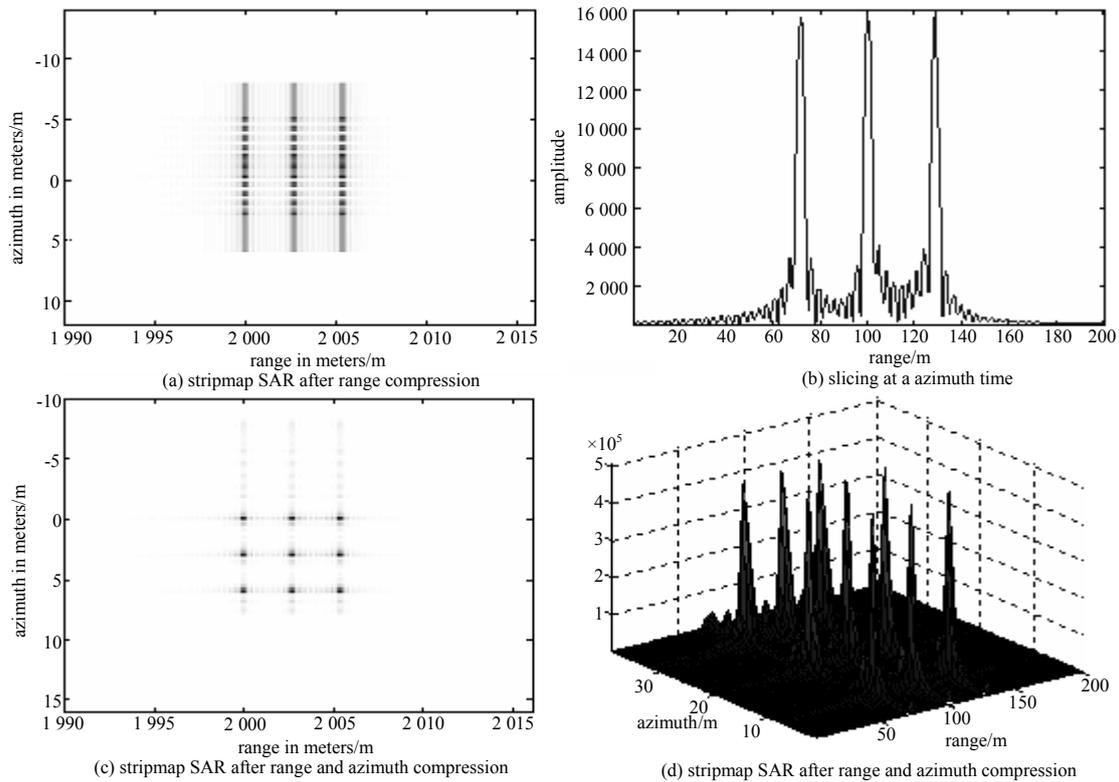


Fig.3 Simulation result of the stripmap SAR dot matrix targets

图 3 SAR 点阵目标仿真结果

## 参考文献:

- [ 1 ] 牧凯军,张振伟,张存林. 太赫兹科学与技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009,4(3):221-230. (MU Kai-jun,ZHANG Zhen-wei,ZHANG Cun-lin. Terahertz Science and Technology[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009,4(3):221-230.)
- [ 2 ] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. (XU Jing-zhou,ZHANG Xi-cheng. Terahertz Science and Application[M]. Beijing:Peking University Press, 2007.)
- [ 3 ] 沈斌. THz 频段 SAR 成像及微多普勒目标检测与分离技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008. (SHEN Bin. THz Wave SAR Imaging and Micro-Doppler Target Recognition[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2008.)
- [ 4 ] Cumming I G,Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data[M]. Boston:Artech House, 2005.
- [ 5 ] Walsh K P,B Schulkin,D Gary,et al. Terahertz near-field interferometric and synthetic aperture imaging[C]// proceedings of the In Proc SPIE, Orlando,FL,USA:[s.n.], 2004:9-17.
- [ 6 ] Hara J O,Grishchowsky D. Synthetic phasedarray terahertz imaging[J]. Optics Letters, 2002,27(12):1070-1072.
- [ 7 ] McClatchey K,Reiten M T,Chevillie R A. Time resolved synthetic aperture terahertz impulse imaging[J]. Applied physics letters, 2001,79(27):4485-4487.
- [ 8 ] 张存林,张岩,赵国忠,等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (ZHANG Cun-lin,ZHANG Yan,et al. Terahertz Sensing and Imaging[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [ 9 ] Heremans R,Vandewal M,M Acheroy. Synthetic aperture signal processing for high resolution 3-D image reconstruction in the THz-domain[C]// proceedings of the 17th European Signal Processing Conference(EUSIPCO), Glasgow,Scotland:[s.n.], 2009:744-748.
- [ 10 ] Heremans R,Vandewal M,Acheroy M. Synthetic Aperture Imaging Extended towards Novel THz Sensors [C]// proceedings of the IEEE Sensors 2008, Lecce,Italy:[s.n.], 2008:438-441.
- [ 11 ] Heremans R,Vandewal M,Acheroy M. Space-time versus frequency domain signal processing for 3D THz imaging[C]// proceedings of the IEEE Sensors 2009, Christchurch,New Zealand:[s.n.], 2009.
- [ 12 ] 张蕾. 国外无人机发展趋势及关键技术[J]. 电讯技术, 2009,49(7):88-92. (ZHANG Lei. Developing Trend and Key Techniques of Unmanned Aircraft Vehicles(UAVs) in Foreign Countries [J]. Telecommunication Engineering, 2009,49(7):88-92.)

(下转第 382 页)