

文章编号:1001-9014(2004)04-0295-04

# 使用卡氏天线的弹载 3mm 三波束探测系统的研究

钱嵩松, 李兴国, 缪晨

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏南京 210094)

**摘要:**以弹载应用为背景,提出了一种 3mm 被动毫米波多波束探测系统设计方案.该系统使用一个接收机及两组 PIN 管,可实现三通道的功能.在介绍了系统的工作原理后,对系统的主要参数进行了详细的设计.分析和实验表明该系统是可行的.

**关键词:**毫米波;卡氏天线;多波束;辐射计

**中图分类号:**TN911.7;TN82;TN8237.28 **文献标识码:**A

## RESEARCH OF BOMB-BORNE 3mm THREE BEAMS DETECTION SYSTEM WITH CASSEGRAIN ANTENNA

QIAN Song-Song, LI Xing-Guo, MIAO Chen

(Institute of Millimeter Wave and Optical Wave Near Sensing Technology,  
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A design of 3mm passive millimeter wave multi-beam detection system was proposed on the background of bomb-borne application. The system can form three channels with just one receiver and two groups of PINs. After introducing the principle of the system, the main parameters of the system were designed detailed. Analysis and experiment show that the design is feasible.

**Key words:** millimeter wave; Cassegrain antenna; multi-beam; radiometer

### 引言

传统的弹载探测系统由于采用单天线扫描,一直受到波束停留时间短,成像分辨率低的困扰.因此,毫米波多波束阵列探测技术在弹载应用中得到了极大的关注.其中,毫米波焦平面阵列<sup>[1]</sup>结合直接检波式接收机<sup>[2]</sup>是最有可能率先得到实际应用的.通常,焦平面探测器阵列中的每一个探测元后都要求接有一个接收机.但是,一方面由于目前接收机的价格仍然很高,另一方面在弹载系统中不会有太大的空间安置众多的接收机,因此,本系统引入了两个 PIN 开关组,仅使用了一个接收机,达到了三波束三通道的效果.

### 1 系统原理

毫米波焦平面系统是将多元探测器阵列置于聚焦天线的焦平面上,利用馈源偏焦产生多个不同指

向的波束覆盖视场.原则上每一馈源后都应有一接收机;但由于接收机的价格高和弹载系统中空间小的缘故,本系统仅使用一个接收机,而引入了两个 PIN 开关组来实现多通道的功能,图 1 给出系统的工作原理图.其中 PIN 开关的作用是接通或关闭馈源,时序控制电路的作用是使各 PIN 开关依次接通各个馈源,时延电路的作用是使后一组开关的动作比前一组延迟一个接收机处理时间,则最终达到的效果就如同同时形成了几个波束.

通常探测器飞过坦克等目标的时间为几个 ms 至几十 ms,此处就设为 5ms, PIN 开关的速度为 5ns,每次馈源的接通时间取为 90ns,则探测器飞过目标时 PIN 开关组动作 50 次,每个馈源接通 17 次,则各馈源的总积分时间为  $90 \times 17 = 1530\text{ns} \approx 1.5\text{ms}$ .目前典型接收机的积分时间已可小于 1ms,因此积分时间是完全够用的.

当三波束弹载探测系统扫过地面目标时,若目

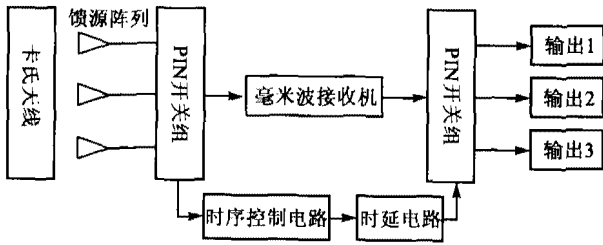


图1 毫米波阵列探测系统原理图

Fig.1 Principle figure of millimeter wave array exploration system

标在扫描线的中心,则输出波形如图2(a)所示;当目标偏向一边时,则输出波形如图2(b)所示.可见,多波束阵列系统在同一时间内可获得多组接收信号进行比较,从而有效地提高了目标识别的概率及目标中心的定位精度.

## 2 卡塞格伦天线系统

弹载系统中空间有限,因此通常使用卡塞格伦天线,因为它可以短焦距抛物面实现长焦距的性能,大大缩短了天线的纵向尺寸.此外,卡氏天线还有其它一些优点:馈源置于抛物面顶点附近,易于调整,馈线短,损耗小,口径场分布较均匀及口径效率较高等.

### 2.1 喇叭馈源

设喇叭口直径为  $d$ ,斜径为  $R$ .设计增益为17.6 dB,又取平方律相差的无量纲常数  $S = 0.20$ ,则查表可知  $GF = 1.30\text{dB}$  ( $GF = \text{ATL} + \text{PEL}$ ,其中  $\text{ATL}$  为幅度渐削效率,  $\text{PEL}$  为相位误差效率).在  $\lambda = 3.2\text{mm}$  时,由文献[3]中给出的公式

$$d = \frac{\lambda}{\pi} \cdot 10^{\frac{G+GF}{20}} = 8.97\text{mm}, \quad (1)$$

$$R = \frac{d^2}{8\lambda S} = 15.73\text{mm}. \quad (2)$$

设喇叭波束的E面和H面的10dB半张角分别为  $\theta_E$  和  $\theta_H$ ,两相心距口径中心的距离分别为  $R_E$  则和  $R_H$ ,仍由文献[3]中的公式,可得  $\theta_E = 19.21^\circ, \theta_H = 23.97^\circ$  及  $R_E = 4.80\text{mm}, R_H = 1.84\text{mm}$ .

### 2.2 卡氏天线的参数选择

卡氏天线如图3所示.在本弹载系统中已限定主面直径为  $D_m = 144\text{mm}$ ,取天线的焦径比为  $F_m/D_m = 0.25$ ,则抛物面的焦距  $F_m = 36\text{mm}$ .由文献[4]给出的公式,可得主面半张角  $\theta_{1m}$  为

$$\theta_{1m} = 2\arctan(D_m/4F_m) = 90^\circ. \quad (3)$$

卡氏天线的放大率  $M$  的典型值在4~11之间,本系统取  $M = 9$ ,则副面离心率为  $e = 1.25$ .副面的

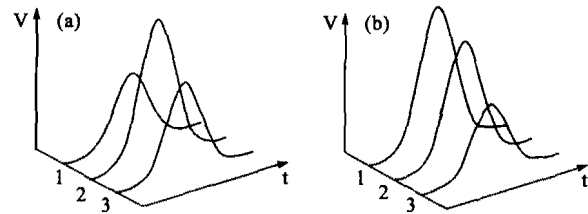


图2 多波束在目标不同位置的输出信号(a)目标中心位于扫描线中心(b)目标中心偏离扫描线中心

Fig.2 Output signals of multi-beam detector at different position(a) scanning beam at the centre of target (b) scanning beam deviating from the centre of target

半张角  $\theta_{2m}$  为

$$\theta_{2m} = 2\arctan(D_m/4MF_m) = 12.68^\circ. \quad (4)$$

由于副面对主面有遮挡作用,故副面的大小对天线旁瓣,特别是近旁瓣有重要影响.工程中通常按如下公式确定副面直径

$$D_s = \sqrt{2F_m\lambda/k}. \quad (5)$$

其中,  $k$  为馈源口径直径与其遮挡直径之比,此处取  $k = 0.85$ ,则  $D_s = 16.46\text{mm}$ ,主副面直径比  $D_s/D_m \approx 0.11$ .由  $k$  和  $D_s$  经一些简单的计算,可得三个馈源和副面的总遮挡面积为  $355\text{mm}^2$ ,又主面面积为  $\pi D_m^2/4 = 16286\text{mm}^2$ ,故遮挡比为  $355/16286 = 2.2\%$ .对三馈源阵列而言,这一遮挡比是不算大的.此外还可求出副面两焦点之间的间距为  $2c = 36.59\text{mm}$ ;馈源前伸量为  $z = 2.73\text{mm}$ ,这个值可保证天线的实焦点落在喇叭馈源的两相心之间.天线的3dB波宽  $\theta_{3\text{dB}}$  约为

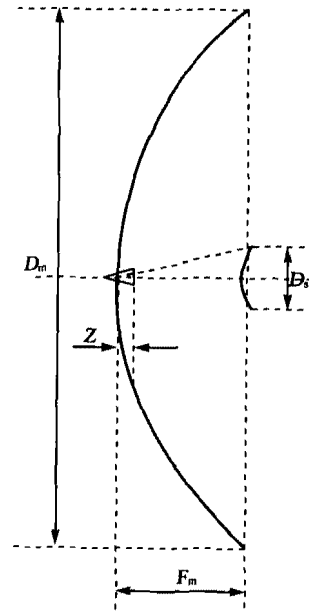


图3 卡塞格伦天线系统

Fig.3 Cassegrain antenna system

$$\theta_{3dB} = (\lambda/D_m) \cdot 70^\circ = 1.56^\circ. \quad (6)$$

天线的增益系数  $g$  (包括主、副面的截获效率和天线口径利用效率) 可用如下公式估计<sup>[5]</sup>

$$g = \frac{2 \cdot \int_0^{\theta_{2m}} f(\theta) \cdot \tan(\theta/2) \cdot d\theta}{\tan^2(\theta_{2m/2}) \cdot \int_0^\pi f^2(\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta}. \quad (7)$$

其中,  $f(\theta)$  是喇叭馈源的方向性函数, 有如下经验公式

$$f(\theta) = 10^{-\frac{1}{2}(\frac{\theta}{\theta_{10dB}})^2}. \quad (8)$$

其中,  $\theta_{10dB}$  是喇叭的 10dB 波宽的一半. 由式(7)和式(8)可得出  $g \approx 0.56$ . 但由于本系统中天线的副面较小, 绕射损失较大, 因此实际的增益系数要小一些. 此外, 支杆的遮挡, 天线表面的加工误差, 天线的安装精度误差, 交叉极化及热损耗都将引起天线效率的下降. 小口径卡氏天线的效率不超过 50%, 本天线系统的效率约为 40%. 则总的增益为

$$G = 10 \lg \left[ \left( \frac{\pi D_m}{\lambda} \right)^2 \cdot \eta \right] = 39 \text{dB}. \quad (9)$$

### 2.3 馈源间距的确定

前已算得天线的 3dB 波宽为  $\theta_{3dB} = 1.56^\circ$ , 则在  $H = 120\text{m}$  的高空, 3dB 波束在地面上形成的圆的半径为

$$r = H \cdot \tan(\theta_{3dB}/2) = 1.66\text{m}. \quad (10)$$

设坦克面积为  $3 \times 5\text{m}^2$ . 现要求当中间波束扫到坦克中心时, 两侧的波束所照射到的坦克面积至少应为整个圆面积的 20% (当波束偏转角不大时, 可近似认为两侧的波束与中间的波束是一样的), 如图 4 所示. 则当中间的探测器输出最大值时, 两侧的探测器也能有明显的输出. 这就要求图中的  $\Delta d$  至少应有 0.8m, 而两圆的圆心间距  $\Delta R$  不应大于 3.33m. 这样, 则两侧的波束偏转角不应大于  $\theta_0$ .

$$\theta_0 = \arctan(\Delta R/H) = 1.60^\circ, \quad (11)$$

而馈源的偏转角不应大于  $\theta_f$

$$\theta_f = \theta_0/\text{BDF}. \quad (12)$$

其中, BDF 为波束偏移因子. 本卡氏天线的等效抛物物面的焦径比为  $MF_m/D_m = 2.25$ , 由文献[6]中给出的图表知  $\text{BDF} \approx 0.98$ , 则  $\theta_f = 1.62^\circ$ . 则馈源偏离天线轴的距离不应大于  $\Delta l$

$$\Delta l = MF_m \cdot \tan\theta_f = 9.18\text{mm}. \quad (13)$$

这个距离略大于喇叭馈源的直径, 故可使两侧的馈源各偏离天线轴一个喇叭直径的距离.

另一方面, 馈源偏焦会引起天线增益下降, 靠近轴线的旁瓣电平升高等不良影响. 但只要偏焦的距

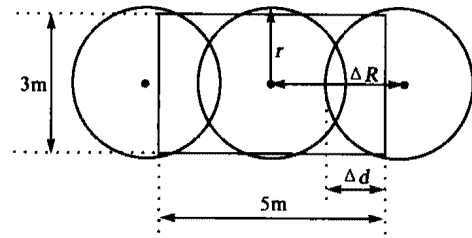


图4 波束间距的确定

Fig. 4 Decision of distance among beams

离限于一定范围内, 天线的性能降低并不严重.

设  $GL$  为馈源横向偏焦引起的增益损失,  $n_{\max}$  为在给定  $GL$  的水平下, 波束最多能偏移的 3dB 波宽的个数. 根据文献[7]

$$GL = 5 \left\{ 1 - \cos \left[ \frac{2\pi n_{\max}}{190k(MF_m/D_m)} \right] \right\}, \quad (14)$$

其中

$$k = 1 - \exp(-0.12\sqrt{D_m/\lambda}). \quad (15)$$

由  $D_m/\lambda = 45$  知,  $k \approx 0.55$ ; 取  $GL = 1\text{dB}$ , 则  $n_{\max} \approx 21$ . 现馈源的横向偏焦角度为  $\theta_f = 1.62^\circ$ , 这个角度远小于在天线增益损失 1dB 的情况下可允许的馈源最大偏离角, 故由此引起的增益损失可忽略, 旁瓣电平变化也不大. 但是, 由于馈源增多而使遮挡面积增大, 会使天线的增益下降一些.

### 3 毫米波辐射计的直接检波式接收机

目前, 毫米波辐射计有超外差和直接检波两种结构形式. 两者相比, 直接检波式接收机具有不需要本振、直接功耗和噪声温度均较低等优点, 便于系统小型化、集成化. 直接检波式接收机主要由低噪声放大器、毫米波检波器和视频放大器组成, 如图 5 所示.

辐射计的灵敏度可用下式表示

$$\Delta T_{\min} = \frac{F_m T_0}{\sqrt{B\tau}}. \quad (16)$$

其中,  $F_m$  为系统噪声系数, 本系统  $F_m = 6\text{dB}$ ;  $T_0$  为环境温度, 通常取为  $T_0 = 290\text{K}$ ; 系统带宽  $B = 1000\text{MHz}$ , 积分时间就取为  $\tau = 1\text{ms}$ , 则可求得  $\Delta T_{\min} = 1.2\text{K}$ . 这一温度灵敏度已足以分辨金属目标和自然界之间的温差了.

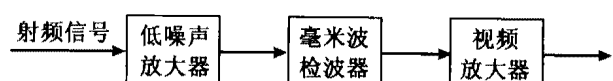


图5 直接检波式接收机结构

Fig. 5 The configuration of direct detection receiver

本系统接收机的低噪声放大器由 InGaAs HEMTS 管 LNA 构成,采用 3 至 4 级级联即可获得 65 ~ 70dB 的增益,系统噪声系数为 3 ~ 4dB,此即可满足系统高增益低噪声要求.此外,毫米波检波器要采用肖特基势垒二极管构成.

#### 4 结语

针对弹载应用中空间小的情况,提出了一种仅使用一个接收机实现三通道的方法,并对系统的主要参数进行了仔细的分析设计.由于该系统简单易行,且成本低,因此是有实际应用价值的.

#### REFERENCES

- [1] ZHANG Yong. The research of passive millimetre wave imaging techniques[D]. Ph. D. Dissertation of NUST(章勇. 被动毫米波成像技术的研究. 南京理工大学博士学位论文), 1999.
- [2] WANG Min, LI Xing-Guo, WU Wen. 8mm-band direct detection receiver[J]. *J. Infrared Milli. Waves*(汪敏,李兴国,吴文. 8mm 波段直接检波式接收机研究. 红外与毫米波学报), 2002, 21(4): 310—313.
- [3] LIN Chang-Lu, CHEN Hai, WU Wei-Gong. *Modern Antenna Design*[M]. Beijing: Post & Telecommunication Press(林昌禄,陈海,吴为公. 近代天线设计. 北京:人民邮电出版社), 1990: 420—427.
- [4] HUANG Li-Wei, JIN Zhi-Tian. *Reflecting Antenna*[M]. Xian: Northwest Telecommunication Engineering College Press(黄立伟,金志天. 反射面天线. 西安:西北电讯工程学院出版社), 1986: 1—28.
- [5] ZHANG De-Qi. *Microwave Antenna Foundation*[M]. Beijing: Beijing Industry College Press(张德齐. 微波天线基础. 北京:北京工业学院出版社), 1985: 286—292.
- [6] Ruze J. Lateral-feed displacement in a paraboloid[J]. *IEEE Trans. AP*, 1965, 13(5): 660—665.
- [7] Yngcesson K S. Imaging front-end systems for millimetre waves and sub-millimetre waves[J]. *SPIE*, 1985, 598: 104—113.