

现代 DPCA 技术研究

王永良¹, 陈建文², 吴志文¹

(1. 空军雷达学院重点实验室, 武汉 430010; 2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 本文从空时二维处理角度出发, 研究了现代相位中心偏置天线 (DPCA) 的几种实现形式及其相应的杂波抑制机理, 其中包括二单元 DPCA、多相位中心 DPCA、多相位中心-多延迟处理 DPCA、- DPCA、频域 DPCA 等几种典型方式. 着重分析了不满足 DPCA 条件时, 各种 DPCA 的杂波抑制能力.

关键词: 机载雷达; 杂波抑制; 相位中心偏置天线; 空时自适应处理

中图分类号: TN959.73, TN927.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 06-0118-04

Research on modern DPCA techniques

WANG Yong-liang¹, CHEN Jian-wen², WU Zhi-wen¹

(1. Key Research Lab, Wuhan Radar Academy, Wuhan 430010, China; 2. College of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: From the point of view of the space-time adaptive processing, the principle and realization of modern airborne Displaced Phase Center Antenna (DPCA) techniques are researched in this paper, which include two-element DPCA, multiple phase centers DPCA, multiple phase centers-cascade DPCA, - DPCA and frequency domain DPCA. Moreover, when the DPCA condition is not satisfied, the clutter suppression performance of DPCA is analyzed in detail.

Key words: Airborne radar; Clutter rejection; DPCA; Space time adaptive processing

1 引言

机载雷达由于雷达安置于飞机上, 当雷达下视工作时, 将面临大量的地(海)面杂波. 由于多种原因, 其中包括高掠射角造成的杂波后向散射增加、机载平台运动引起的杂波频谱扩展和地杂波回波随地形变化的大幅度起伏等因素, 使得杂波抑制变得十分困难. 关于机载雷达的运动补偿与杂波抑制技术的研究起源于六十年代, 主要使用时间平均杂波相干机载雷达 (TACCAR) 和相位中心偏置天线 (DPCA) 系统^[1]. TACCAR 技术主要采用锁相环跟踪杂波的平均多普勒频率, 同时偏置雷达发射频率或混频参考频率, 以使混频后的杂波信号相位稳定, 从而修正与天线波束方向轴平行的平台速度分量. DPCA 技术在每两个脉冲间通过阵列天线孔径相对于飞行方向的偏移来补偿雷达平台的运动, 以修正平台速度的垂直分量. 但是, 传统的 DPCA 雷达杂波抑制技术的性能常常受到限制, 一方面是由于受到动目标显示技术的影响, 只考虑了两个时间采样的情况, 时域分辨率不良, 因而其整体性能受到限制; 另一方面是因为孔径低效以及飞机速度与脉冲重复频率之间要满足严格的关系. 因此, 传统的 DPCA 技术的应用场合, 也受到一定的限制. 为了有效地实现杂波抑制, 改善机载雷达对微弱目标的检测能力, 目前已发展了一种称之为空时二维自适应处理 (STAP) 的技术, 且已成为雷达领域的研究热点^[2], 多种 STAP 处理方法已提出^[3~7], 其理论也日趋完善^[8], 将在

下一代的多种机载雷达中获得广泛应用, 针对阵面在方位上任意放置时机载雷达空时二维信号处理方法也进行了深入的研究^[9,10]. 但实际上, 传统的 DPCA 技术与空时二维处理存在着内在联系^[11~14], 它可以作为空时二维滤波的特例, 尤其是自适应 DPCA, 实质上是空时二维自适应处理 (STAP) 最简单的情形.

DPCA 技术经过几十年的发展, 已被现役机载雷达广泛采用, 至今有关 DPCA 的研究仍是机载雷达领域的热点, 已提出了各种各样的变形方式, 并进行了大量的理论分析^[15]. 随着 STAP 理论与技术的完善与发展, 也推动了 DPCA 技术的发展, 产生了多种实现形式. 下面, 从空时二维处理角度来进一步分析与研究这一问题, 它本身具有重要的理论与实际意义, 同时也为空时二维自适应处理的研究提供基础.

2 现代 DPCA 技术

二单元(天线) DPCA 是最基本的实现形式, 从二单元 DPCA 来说明 DPCA 的杂波抑制机理, 进而推广到其它实现形式.

2.1 二单元 DPCA

二单元 DPCA 的二维滤波特性为

$$H_S, T(f_d, \cos \theta) = 1 - e^{j2\pi (d/\lambda) \cos \theta f_d T} \quad (1)$$

其中 $f_d = (2V_r/\lambda) \cos \theta$, 由 $H_S, T(f_d, \cos \theta) = 0$, 要求 $(d/\lambda) \cos \theta$

- $f_d T = 0$, 若取 $d = 2V_r T$, 则得

$$\cos = (T/d)f_d = (f_r/4V_r)\bar{f}_d \quad (2)$$

令 $= f_r/(4V_r)$, 可得直线方程 $\cos = \bar{f}_d$. 而杂波分布线刚好为 $\cos = \bar{f}_d$, 因此能有效地抑制杂波.

当 $d = 2V_r T$ 的 DPCA 条件不满足时, 滤波器凹口线的斜率发生变化, 它不可能在整个二维平面上与杂波斜脊背线重合, 从而不能有效滤除杂波, 因此杂波抑制性能对误差影响非常敏感.

如果将这种简单 DPCA 扩展为自适应 DPCA, 记为 ADPCA, 可以适当地补偿误差带来的影响, 这时 ADPCA 的二维滤波特性可以描述为

$$H_{S,T}(f_d, \cos) = 1 - w e^{j2((n-1)d/\cos - f_d T)} \quad (3)$$

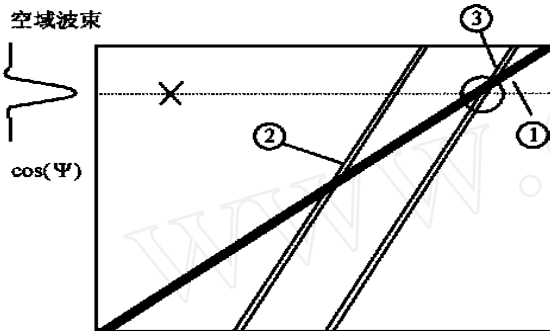


图 1 DPCA 杂波抑制机理

其中 w 为自适应权系数. 杂波抑制的机理可以用图 1 来说明. 滤波凹口如图 1 中所示, 其斜率取决于天线相位中心间距和航速、PRF 等参数. \cos 表示杂波分布线. 自适应权 w 可以将线平行移动至线, 使与相交处对准主杂波区, 这样, 可以较好地滤除主杂波, 但无法抑制旁瓣杂波, 因为旁瓣区二线仍然是错位的.

2.2 多相位中心 DPCA

上述两天线 DPCA 可推广到多天线相位中心, 相位中心的间距只要满足 $d = 2mV_r T$ (m 为整数) 即可, 加权系数可以采用最大输出信干比准则计算. 实质上即为自适应数字波束形成, 只不过它对阵元间距有特殊的要求.

理想情况下, 可按如下简单公式求得:

$$W_k(N) = \frac{(-1)^k (N-1)!}{(N-k)! (k-1)!}, \quad k=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中 N 为相位中心个数. 譬如, $N=2$ 时, $W_1(3) = -1$, $W_2(3) = 2$, $W_3(3) = -1$. 由于控制自由度增加, 运动补偿的性能也相应好一些. 数字模拟表明: 滤波器凹口的宽度决定于多相位中心的最大孔径, 而与相位中心无关, 直接影响慢速目标的检测性能; 相位中心的个数越多, 盲速点处性能愈好, 旁瓣不匹配会导致性能急剧下降.

2.3 多相位中心-多延迟处理 DPCA

两天线 DPCA 系统要求天线距离与航速和脉冲重复频率之间有严格的等效关系, 出现误差因素时, 如单元不一致、安装误差、航速偏差、飞机振动等, 补偿能力将严重下降. 当利用多相位接收中心时, 可在多个接收端同时接收, 如图 2 所示.

假设雷达以 V_r 速度向右运动, 那么, 若由 1# 单元发射,

在 1#、2# 单元接收, 根据前面分析, 要求 $2V_r T = d$ (d 为两单元间的距离). 若使用 1#、 n # 单元接收, 则要求满足

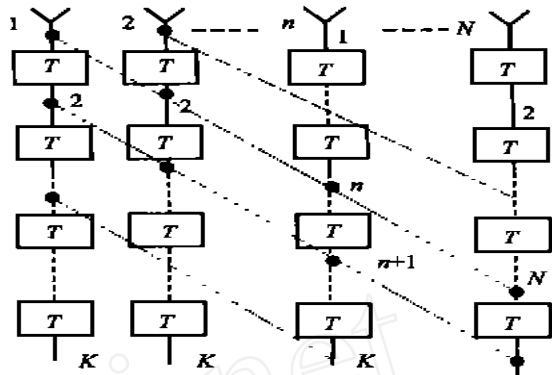


图 2 多阵列的 DPCA 系统

$$2V_r T = (n-1)d \quad (5)$$

式(5)表示要求脉冲间的移动等于半个阵元间距的整数倍才能得到补偿, 若 n # 单元延迟 kT 以后接收, 并作相应处理, 则由式(5)可得二维滤波特性为

$$H_{S,T}(f_d, \cos) = 1 - e^{j2((n-1)d/\cos - f_d kT)} \quad (6)$$

它可以沿直线 $((n-1)d/\cos - f_d kT) = 0$ 形成零点. 由于 $f_d = (2V_r/\lambda)\cos$, 为了使它与二维杂波分布一致, 需取

$$(n-1)d = k(2V_r T) \quad (7)$$

即 $V_r T = (n-1)/(2k)d$. 上式说明了在有多脉冲延迟的多相位模型中, 为了补偿由于平台运动导致脉冲间的移动距离, 并不需要等于半个阵元间距的整数倍也可以达到补偿平台运动引起的杂波展宽的影响. 不过, 在实际情况下, 由于天线单元之间的不一致、机身振动、杂波内部运动等而达不到理想的效果.

对系统的进一步改善是使用自适应补偿. AMTI 雷达就是这种情形, 它以每个天线阵元对两个或多个相消脉冲的输出用分别控制的自适应权值进行加权处理, 处理若以最大信噪比为准, 这实质上就是空时二维自适应信号处理的基本原理. 在这种情形下, 根据前面的分析, 一个阵元级的杂波是可以找到“一个单元”(指二维空间中的一个单元, 即指某个天线单元的某个延迟节点)或“多个单元”的组合加以对消.

2.4 双延迟 DPCA

假设天线是双波束方向图, 一个提供和信号 (S) , 另一个提供差信号 (D) , 差信号用于补偿平台运动效应.

脉冲间相位超前量^[1]

$$2\pi = 2\pi f_d T = 4\pi V_r T \cos / \lambda \quad (8)$$

其中 f_d 为散射体多普勒频率, T 为脉冲重复周期.

一种典型的单脉冲阵列的和信号与差信号具有如下的关系

$$(D) = (S) \tan\left((W/\lambda) \cos\right) \quad (9)$$

其中 W 是天线相位中心距离. 如果选择 $W = 2V_r T$, 并且和差通道信号增益之比 $= 1$, 则将获得理想的对消. 图 3 是双延迟 - DPCA 的结构框图及其频响图, 接收的和差信号相位正交, 经混合放大后, 送至双延迟对消, 和差通道信号增益之

比 应是自适应的,但实际中常用 V_r 来近似控制,性能几乎相同。

双延迟 - DPCA 的性能实际上受到天线接收的旁瓣功率的限制,因为对消只考虑到主杂波区的横向速度 V_r ,而旁瓣散射点的相对速度连续分布在 $-V_r$ 到 V_r ,尤其在 LPRF 和 MPRF 时,多普勒频率覆盖好几个 PRF,旁瓣功率会折叠到滤波器中,引起对消比的下降。

为了深入分析双延迟 DPCA 的杂波抑制机理,式 (10) 给出了一组权系数

$$W = \begin{bmatrix} -0.782202 + j0.949176 & -0.286141 + j0.377068 \\ 0.284925 - j0.385420 & 0.786141 - j0.943116 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式 (10) 可见,权系数矩阵的两对角线元素之和近似为零,说明了和差信号双延迟 DPCA 的杂波对消机理。由图 3 可见,和差波束双延迟 DPCA 二维频响图的等高线轨迹是弯曲的,在主杂波区仍有近似的线性关系,而对应的杂波谱呈直线状分布,因此主杂波区拟合较好,而旁瓣杂波区拟合较差。所以,和差波束双延迟 DPCA 具有较好的主杂波抑制性能,而旁瓣杂波抑制性能较差。

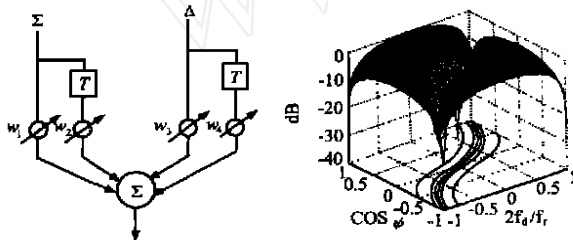


图 3 双延迟 - DPCA 的结构框图及其频响图

2.5 频域 DPCA

DPCA 除了时域实现外,还可推广到频域实现。图 4 为两天线频域 DPCA 的原理框图及其某多普勒通道的空时二维频响图。该方案先对各列子阵的数据作多通道的多普勒滤波,然后分别对同频多普勒滤波器输出的数据作自适应处理。 $w_{1,k}$, $w_{2,k}$ 为第 k 个多普勒通道的两个自适应权系数, y_k 为第 k 个多普勒通道的输出。它通过多普勒处理使得杂波带实现条形分割,须先实现对旁瓣杂波的较好抑制,而通过 DPCA 的实现机理较好地实现主杂波对消,从而获得有效的杂波抑制,取得更好的性能。图 4 给出了对应斜带杂波分布的两天线频域 DPCA 第 12 个多普勒通道的空时二维频响图。由图可见,多普勒通道对斜带杂波进行条形分割,该多普勒通道的空时

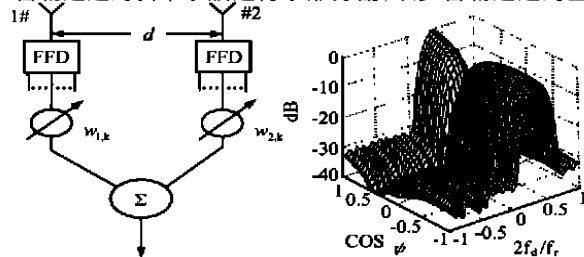


图 4 频域 DPCA 原理框图及其频响图

二维频响图在对应杂波带的位置形成了凹口,可以抑制进入该多普勒通道的条形杂波。但是,因需要进行多普勒滤波,增加了一定的实现复杂度。

3 计算机模拟与分析

这部分以文中提出的多相位中心-多延迟处理 DPCA 系统为例,通过对实例的计算机仿真,从自适应权系数和频响图来分析不同参数情形下 DPCA 的杂波抑制机理,并讨论了 DPCA 与 STAP 的内在联系。

模拟 1 三单元三延迟 DPCA 系统的空时二维响应

模拟实验系统的参数说明如下:矩形平面阵 ($M \times N$) = 3×3 ,阵元间距(包括行、列) $d = 0.115\text{m}$,工作波长 $\lambda = 0.23\text{m}$,载机速度 $V_r = 140\text{m/s}$,载机高度 $H = 8\text{km}$,脉冲数 $K = 3$,天线轴与载机速度矢量夹角为 0° (正侧面阵),波束指向阵面法向,单元杂噪比(CNR)为 60dB 。

当满足 DPCA 条件 $d = 2V_r T$ (T 为脉冲重复周期),在无误差的理想情况下,可以得到如下一组二维滤波器系数 (PRF = 2434.8Hz)

$$W = \begin{bmatrix} -0.255770 - j0.018108 & -0.101487 + j0.123662 & 0.000000 + j0.000000 \\ -0.141082 - j0.075411 & 0.026399 + j0.132714 & 0.101485 - j0.123661 \\ 0.000000 + j0.000000 & 0.141086 + j0.075412 & 0.229371 - j0.114609 \end{bmatrix} \quad (11)$$

每条对角线上的系数和近似为 0,对角线只有一个单元时,该单元系数接近于 0。这证实了上面的分析,即实际是用一个单元或多个单元的组合加以对消。若将每条对角线上的系数当作一矢量,则独立可控的矢量数为 $N + K - 1$,即 R 的大特征值为 $N + K - 1$ 个。式 (12) 为不满足 $d = 2V_r T$ 条件时的另一组二维滤波器系数 (PRF = 1826.1Hz),对角线上的系数和不再为 0。我们注意到,当不满足 DPCA 条件时,上面的分析不再成立,因为它无法满足严格的整数关系,实际对消时采用了“多个单元”的组合来实现。

$$W = \begin{bmatrix} -0.212034 - j0.456776 & -0.083084 - j0.055576 & 0.005466 + j0.001647 \\ -0.088276 + j0.187397 & 0.152517 + j0.766754 & 0.153276 + j0.139350 \\ -0.004420 + j0.003613 & 0.055491 - j0.083140 & 0.021093 - j0.503148 \end{bmatrix} \quad (12)$$

以上两组权系数均说明,多相位中心-多延迟处理 DPCA 系统是用多个单元的组合进行对消的。图 5(a)、(b) 分别为上述两种情形对应的杂波谱和二维频响及其等高线图,由图可见,两种情形下均沿杂波斜带形成了频响凹口,很好地滤除了杂波。

模拟 2 最优处理器与现代 DPCA 技术的相互关系

前面讨论了 DPCA 技术,实际上 DPCA 是最优空时二维处理的一个特例。现代多相位中心 DPCA 技术与最优 STAP 具有几乎相同的结构,只不过对于 DPCA 而言,它需要满足特定的约束关系,即 $d = 2V_r T$,下面对此作一些讨论。

将上述多相位中心 DPCA 的每个通道的接收信号分别延迟积累,便构成了多相位中心-多延迟处理 DPCA,形式和空时二维处理是一样的,不过天线间距要求的物理意义不同,它们之间有很强的联系,实际上多相位中心多延迟处理 DPCA 是

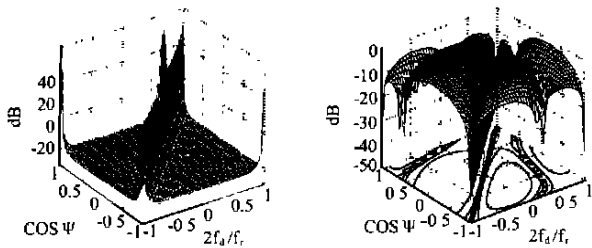
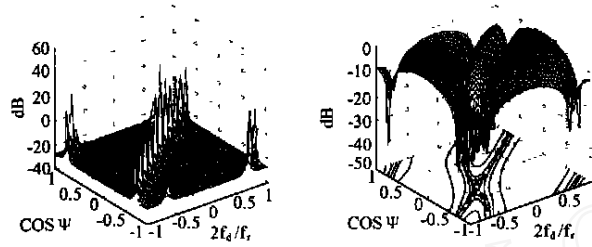
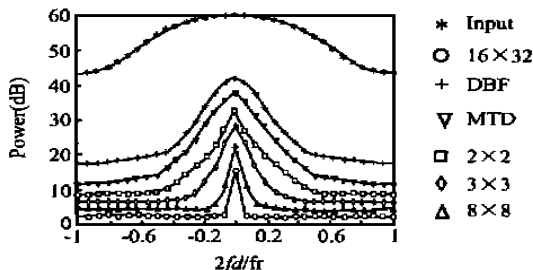
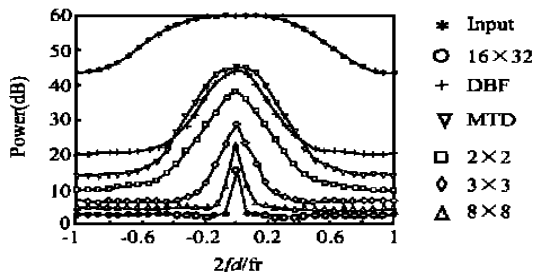
(a) $d = 2V_r T$ (PRF = 2434.8 Hz)(b) $d = \frac{3}{4} \times 2V_r T$ (PRF = 1826.1 Hz)

图 5 多相位中心-多延迟处理 DPCA 系统杂波谱及其二维频响空时二维处理的特殊形式。

如无特别说明,模拟系统的参数同模拟 1。分别讨论满足 DPCA 条件 ($d = 2V_r T$) 和不严格满足 DPCA 条件 ($d \neq 2V_r T$) 情形下,等效线阵单元数 N 和时域采样数 K 取不同值时的性能比较,如图 6(a)、(b) 所示。

(a) 严格满足 DPCA 条件 ($d = 2V_r T$)(b) 不严格满足 DPCA 条件 ($d \neq 2V_r T$)图 6 输入输出杂波功率。(a) 严格满足 DPCA 条件 ($d = 2V_r T$), (b) 不严格满足 DPCA 条件 ($d \neq 2V_r T$)

比较图 6(a) 和 (b) 可知, 16×32 、 8×8 、 3×3 三种情形下, 是否满足关系 $d = 2V_r T$ 对处理器性能几乎没有影响, 但不严格满足 DPCA 条件 ($d \neq 2V_r T$) 时, 2×2 、MTD、DBF 三种情形的处理器性能有所下降, 特别是 MTD 情形下影响最大。

4 结束语

本文介绍了经典的 TACCAR 和传统的 DPCA 技术, 研究了现代 DPCA 技术各种形式的有效实现及杂波抑制的机理, 包括二单元 DPCA、多相位中心 DPCA、多相位中心-多延迟处理 DPCA、-DPCA、频域 DPCA, 并研究了现代 DPCA 技术与空时二维杂波抑制技术的内在关系。着重分析了不满足 DPCA 条件时, 各种 DPCA 的杂波抑制能力, 并从空时二维频响图及自适应权系数方面分析了多相位中心-多延迟处理 DPCA 技术的杂波抑制性能。

从讨论中可以看出, 传统的地杂波抑制方法对载机的运动补偿及杂波抑制能力受到了许多条件的限制, 一旦条件不满足, 其性能将受到较大程度的影响。不过, 和空时二维自适应处理相比, 虽然性能上差一些, 但许多独特的优点使得这些方法仍有生命力, 特别是 DPCA, 目前仍是机载雷达运动补偿的主要方式, 尤其在低重频主杂波区目标的检测问题中应用更为广泛。研究结果表明, 非正侧面阵 DPCA 也可以获得较好的杂波抑制性能。一个阵元级的杂波总是可以找到“一个单元”或多个单元的组合加以抵消, 因此, 它也可以抑制非正侧面阵这种“曲线形”杂波。

另外, 在小型运载平台, 如直升机等, 若安装相控阵天线有困难而采用机扫天线时, 那么上述方法及其很多变形技术 (如用辅助天线方向图提供校正信号等) 是较好的选择。

当天线采用相控阵天线时, DPCA 技术可使用多相位中心方式, 如果不进行自适应处理, 其系统仍将受到多种误差的影响, 空时自适应处理由于其灵活的空间、时间控制, 不需给定严格的相位中心关系, 且对环境与误差有很强的补偿能力, 因此空时二维处理技术必将取代传统方法。



王永良 1965 年出生, 教授, 博士生导师。

1994 年获西安电子科技大学博士学位, 1994 年 6 月 ~ 1996 年 12 月在清华大学做博士后, 现为空军雷达学院兵器运用工程重点实验室主任, 首批入选空军中青年科技拔尖人才。中国电子学会高级会员。已发表论文 60 余篇。曾获省部级科技进步一等奖、二等奖、三等奖各一项。主要研究领域为: 雷达信号处理、阵列信号处理、现代信号处理等。



陈建文 1964 年出生, 1992 年毕业于华中理工大学电子与信息工程系, 获工学硕士学位。

1997 年进入国防科技大学电子技术系攻读博士学位。已发表论文 10 余篇。现从事雷达信号处理、自适应信号处理、信号检测等领域的研究。

吴志文 1968 年出生, 1997 年在空军雷达学院获工学硕士学位。目前主要从事阵列信号处理、自适应信号处理、电子设计自动化等方面的研究。

(下转第 101 页)

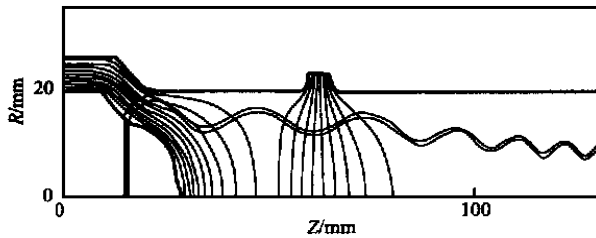


图 7 双阳极电子枪电极形状、电位线和电子轨迹
算,设计了一支性能优良的电子枪. 横向速度零散达到的千分之几. 此电子枪已用于制管实验中. 同时,本文给出的方法与编制的通用软件可为电子枪的分析和设计提供更为可靠的依据和方便.

参考文献

- [1] G. A. 纳吉, M. 西拉支. 空间电荷光学导论. 北京: 科学出版社, 1983
- [2] Sh. E. Tsimring. Synthesis of Systems for the Formation of Helical Electron Beams. NRL memorandum, Report, 3937
- [3] Boris. V. Raisky and Shulim. E. Tsimring. Numerical Simulation of Nonstationary Processes in Intense Helical Electron Beams of Gyrotrons. IEEE Transactions on plasma science, 1996, 24(3): 992 ~ 998

- [4] A. N. Kufin, V. K. Lygin, Sh. E. Tsimring and V. E. Zapevalov. Numerical Simulation and experimental study of magnetron injection guns for powerful short-wave gyrotrons. Int. J. Electronics, 1992, 72(5, 6): 1145 ~ 1151

- [5] 王华军. 回旋管磁控注入枪 CAD. 电子科技大学硕士论文, 1996



王华军 副教授, 1986 年获北京师范大学物理学专业理学学士, 同年分配到成都高等师范专科学校任教. 1997 年获电子科技大学工科硕士学位. 1997 年至今在电子科技大学高能电子学研究所攻读博士学位. 研究方向: 毫米波技术、电子光学系统、数值模拟.



李宏福 现任电子科技大学高能电子学研究所教授、博士生导师. 1960 年毕业于成都电讯工程学院并留校工作. 1989 年 8 月至 1990 年 10 月作业高级访问学者和访问教授在德国斯图加特大学进行大功率毫米波传输线方面的合作研究. 长期从事微波电子学、微波真空器件、微波技术及电子回旋脉塞的教学与科研工作. 已发表学术论文九十多篇, 多次获省部级科研奖及国家发明三等奖.

(上接第 121 页)

参考文献

- [1] M. I. Skolnik. Radar Handbook. Second Edition, New York: McGraw-Hill, 1990: 16. 1 ~ 16. 8, 18. 1 ~ 18. 16
- [2] 王永良, 彭应宁. 机载雷达空时二维自适应信号处理的进展与展望. 电子学报, 1999, 3
- [3] 保铮等. 机载雷达空时二维信号处理. 现代雷达, 1994, 16(1): 31 ~ 39
- [4] H. Wang, Yuhong Zhang and Qingwen Zhang. A view of current status of space-time processing algorithm research. IEEE International Conference of Radar, 1995, 635 ~ 640
- [5] Wang Yongliang, Peng Yingning. Method for simultaneous clutter and jammer rejection in airborne radar. IEE Electronics Letters, 1995, 31(14): 1190 ~ 1192
- [6] Wang Yongliang, Peng Yingning. Space-time joint processing method for simultaneous clutter and jamming rejection in airborne radar. IEE Electronics Letters, 1996, 32(3): 258 ~ 259
- [7] L. E. Brennan, D. J. Piwinski and F. M. Standaher. Comparison of space-time adaptive processing approaches using experimental airborne radar data. The Record of 1993 IEEE National Radar Conference. Massachusetts, U. S. A, Apr. 1993: 176 ~ 181

- [8] 王永良, 保铮, 彭应宁, 陆大. 空时二维自适应处理的统一理论、模型与局域处理方法. 电子学报, 1996, 24(9): 64 ~ 69
- [9] Wang Yongliang, Peng Yingning, Bao Zheng. Space-time adaptive processing for airborne radar with various array orientation. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig., 1997, 144(6): 330 ~ 440
- [10] 王永良, 保铮, 彭应宁. 阵面在方位上任意放置时机载雷达空时二维信号处理方法. 电子学报, 1996, 24(3): 42 ~ 46
- [11] P. G. Richardson. Analysis of the adaptive space time processing technique for airborne radar. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig., 1994, 141(4): 187 ~ 195
- [12] P. G. Richardson. Relationships between DPCA and adaptive space-time processing techniques for clutter suppression. IEEE International Radar Conference, Paris '94: 295 ~ 300
- [13] T. J. Nohara. Comparison of DPCA and STAP for space-based radar. IEEE International Radar Conference, 1995: 113 ~ 119
- [14] L. Lightstone, D. Faubert, G. Rempel. Multiple phase center DPCA for airborne radar. IEEE National Radar Conference, 1991: 36 ~ 40
- [15] 龚耀耀. 机载雷达相位中心偏移天线系统的性能. 电子学报, 1995, 23(9): 24 ~ 27