

隙缝馈电平面阵天线*

田 光 祖

(中国科学院电子学研究所)

(一) 基本要求

合成孔径雷达原理样机需要一部工作在 X 波段,发射水平极化波的扇形波束天线。天线的波束宽度沿飞机航向(E 平面)约 1° ,垂直于航向(H 平面)为 9° ,增益为 30 dB;或在 H 平面上于 11° 的波束宽度内,将波束赋形为 $CSC^2\phi$ (ϕ 为波束宽度),增益为 27dB。天线的结构要适于作侧视安装。

(二) 方案选择

满足以上条件的天线方案有三类:(1)以线阵作照射器,柱形抛物面作反射器的复合天线;(2)以线阵作辐射器,外加有一定张角的两块板构成线阵喇叭形天线;(3)平面阵天线。从结构形式来看,无论是机身侧面安装还是吊舱式安装,平面阵天线都比较合适。

以上三种类型的天线均需线阵,工作在 X 波段作辐射器或照射器用的线阵,目前以隙缝波导最为相宜。

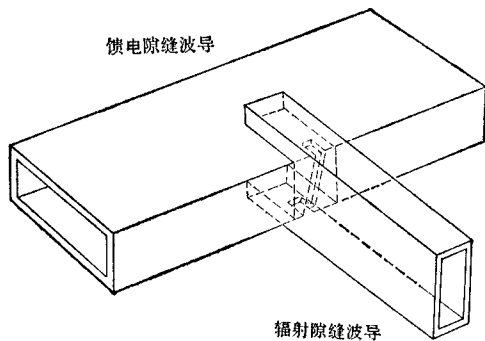


图 1 隙缝馈电

Fig. 1 Slot feeding

根据上述要求,我们研制了一部结构简单的隙缝波导平面阵天线。由波导窄壁上开一系列对称的倾斜隙缝组成波导隙缝线阵。再由若干条这样的线阵平行排列组成平面阵。在平面阵天线中,对每条线阵的馈电可以用波导分支型功率分配器。根据需要用等功率分配或不等功率分配。也可以用波导扇形喇叭功率分配器。上述两种功率分配器虽然都有良好的性能,但结构都比较复杂,加工较难。我们采用与作辐射器用的隙缝波导线阵相同形式的隙缝波导,作为平面阵天线的

馈电装置。从而使整部天线的结构十分简单,紧凑,易于加工,造价低廉。

馈电隙缝波导与辐射隙缝波导互相垂直相接,如图 1 所示。

由馈电波导的隙缝耦合出来的能量,进入相应的辐射隙缝波导的输入端。形成以隙缝馈电,隙缝辐射的平面阵天线。

用隙缝作辐射阵元和激励阵元的优点是:隙缝处的激励场强可以独立控制,能满足对天线口面电流分布的特定要求。对作馈电用的隙缝波导来说,除利用隙缝对波导轴线的不同倾斜角控制其激励幅度外,并可在辐射隙缝波导输入端处加入移相器。调整入射

* 1982年5月19日收到。

波的初始相位, 达到独立控制入射波幅度和相位的目的. 在平面阵天线的 H 平面上作波束赋形.

(三) 设计考虑

在波导窄壁上开倾斜隙缝, 因其轴线与波导内壁的横向电流方向成某一角度. 横向的壁电流受到扰动. 在隙缝处激励起垂直于隙缝轴线的电场. 从电路的观点来看, 隙缝线阵相当于传输线上的一系列并联元件. 其相应的电导值与隙缝倾斜角有关. 由已知关系式^[1]

$$G = \frac{30}{73\pi} \left(\frac{\lambda_g}{\lambda}\right) \frac{\lambda^4}{a^3 b} \left[\frac{\sin \theta \cos\left(\frac{\pi\lambda}{2\lambda_g} \sin \theta\right)}{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_g}\right)^2 \sin^2 \theta} \right]^2 \quad (1)$$

可以计算出不同倾斜角度的隙缝相应的电导值 G . 其中 λ —— 工作波长, λ_g —— 波导波长, a —— 波导内壁宽边尺寸, b —— 波导内壁窄边尺寸, θ —— 隙缝倾斜角. 然而在实际设计时, 我们认为实测各种不同倾斜度的等角度隙缝波导线阵的 G 与 θ 的关系, 以测量值为根据进行设计更符合实际情况.

在隙缝长度等于半个工作波长时, 在线阵终端放一匹配负载, 构成行波式线阵. 其输入端的反射系数 ρ 可由公式^[2]

$$\rho = \frac{-\sum_{n=1}^N \frac{1}{2} G_n e^{-i\alpha_B 2nd}}{1 + \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} G_n} \quad (2)$$

进行计算. 式中, $\alpha_B = 2\pi/\lambda_g$, N —— 隙缝数, d —— 隙缝间距, G_n —— 阵中任一隙缝的电导值. 在频率变化不大时可以认为 $\sum G_n$ 是常数, 则 ρ 仅与 $\alpha_B 2nd$ 有关. (2) 式在 $d = \lambda_g/2$ 时 ρ 最大. 因此隙缝的间距 d 要避免等于 $\lambda_g/2$. 我们取辐射隙缝波导的间距为 $0.52 \lambda_g$, 馈电隙缝波导的间距为 $0.43 \lambda_g$. 改变相邻隙缝的倾斜方向可以得到 180° 的相位差.

波导隙缝线阵的辐射效率与阵中单个隙缝的最大电导值有关. 为了避免使倾斜角度过大, 交叉极化分量太强, 通常取最大归一化电导值等于 0.1, 可使交叉极化分量电平低于主极化电平 -20 dB. 由于天线的波束宽度在 E 平面较窄约 0.87° , 取 $N = 80$, 使最大电导值为 0.1 较合适. 但天线的波束宽度在 H 平面较宽约 9° , 取 $N = 10$, 如仍取最大电导值为 0.1, 则效率将低得无使用价值. 考虑到馈电隙缝波导外部与辐射隙缝波导输入端垂直相接. 馈电隙缝的倾斜角度适当加大, 虽然产生的交叉极化分量电平也加强, 但它不能在辐射隙缝波导中激励起 TE_{10} 传输波型. 故可适当加大倾斜角, 如最大倾斜角取 30° . 实际最大归一化电导值约为 0.2, 则效率接近 60%. 行波式线阵的效率与电导值有如下关系^[3]

$$G_i = \frac{P_{ri}}{\frac{1}{\eta} \sum_{i=1}^N P_{ri} - \sum_{i=1}^i P_{ri}} \quad (3)$$

其中 G_i —— 第 i 条隙缝的归一化电导, η —— 隙缝线阵的辐射效率或馈电效率, P_{ri} ——

第 i 条隙缝的辐射功率或馈电功率。先假定 η 为某一值,在设计辐射隙缝波导时,以计算出最大归一化电导值等于 0.1 为准。在设计作馈电用的隙缝波导时,以计算出最大归一化电导值等于 0.2 为准。

在平均发射功率约 2W 时,我们用介质移相器调整辐射隙缝波导输入端入射波的初始相位。介质移相器用 3 mm 厚聚苯乙烯板,两端作成阶梯式阻抗过渡段以减少电波反射。移相量随介质片在波导中的位置而改变。最小相移 2° ,最大相移 195° 。相移量连续

可调,并事先校准。频率为 9375 MHz 时校准误差为 $\pm 1.5^\circ$ 。移相器的电压驻波系数 ≤ 1.06 。隙缝宽度取 1.59 mm。将 H 平面的波束赋形为 $CSC^2 \phi$ 形波束,我们用了两种计算方法。一种是用傅氏变换迭代综合天线方向图,另一种是口径作等幅分布,相位按平方律变化对波束赋形。前者的波束图形较好,但由于隙缝数太少口径效率下降较多。后者效率下降较少达到了指标要求。

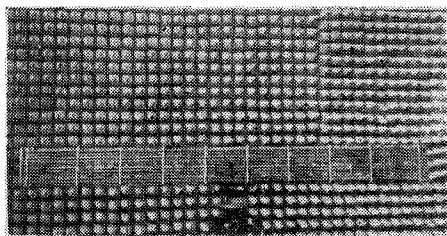


图 2 隙缝馈电平面阵天线

Fig. 2 Slot feeding planar array antenna

(四) 测试结果

所研制的平面阵天线如图 2 所示,它由 1 条馈电隙缝波导和 10 条辐射隙缝波导组成。隙缝总数为 800,平面阵上 E 平面口径分布为等幅同相。H 平面口径分布按上述两种计算设计。在中心频率 $f_0 \pm 10\text{MHz}$ 内,测试结果如下:

馈电隙缝波导输入端电压驻波系数如表 1 所示。

表 1 Tab. 1

频 率 (MHz)	9365	9375	9385
馈电隙缝波导的电压驻波系数			
傅氏变换迭代法	1.35	1.34	1.35
等幅平方律相位法	1.20	1.20	1.20

两种隙缝波导的效率,3 dB 波束宽度和平面阵天线的增益分别如表 2 (a) 和表 2 (b) 所示。

表 2 (a) Tab. 2 (a)

波导种类		馈电隙缝波导	辐射隙缝波导
效率 (%)	计算值	60	88
	测试值	60	90
波束宽 (度)	计算值	9	0.87
	测试值	8.5	0.84

表 2 (b) Tab. 2 (b)

天 线		平面阵天线
增益 (dB)	计算值	31.3
	测试值	30

方向图示于图 3 和图 4。

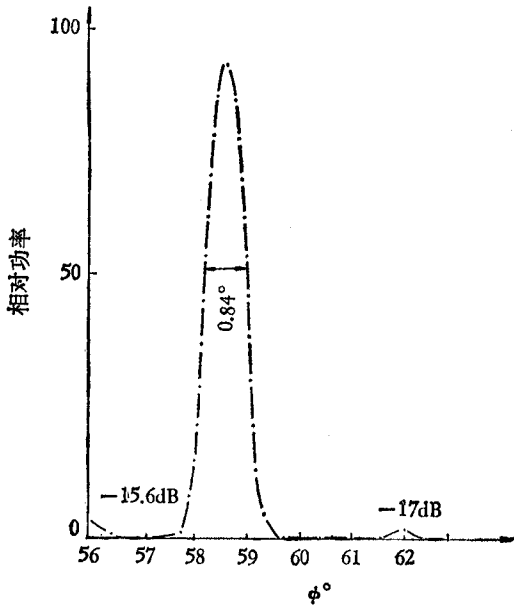


图3 E平面方向图
Fig. 3 Pattern of E plane

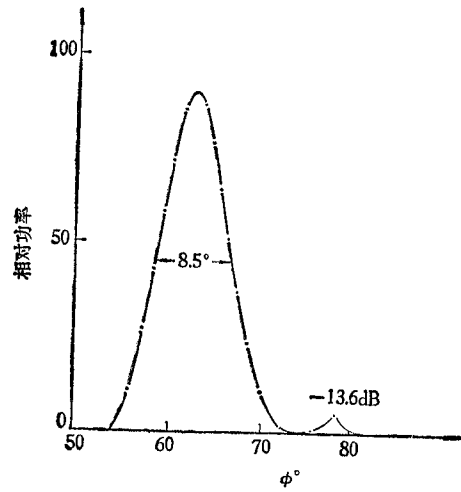


图4 H平面方向图
Fig. 4 Pattern of H plane

波束赋形的方向图示于图5和图6。

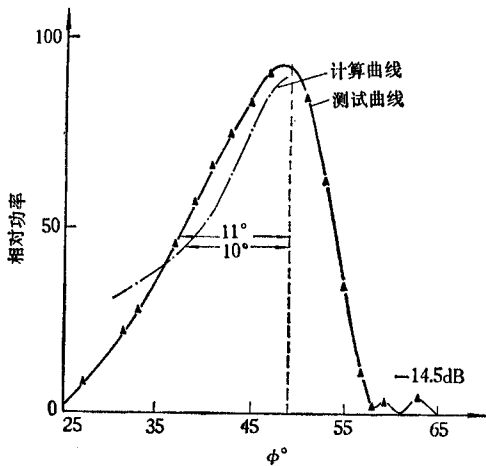


图5 傅氏变换迭代法
Fig. 5 Method of Fourier transform-iteration

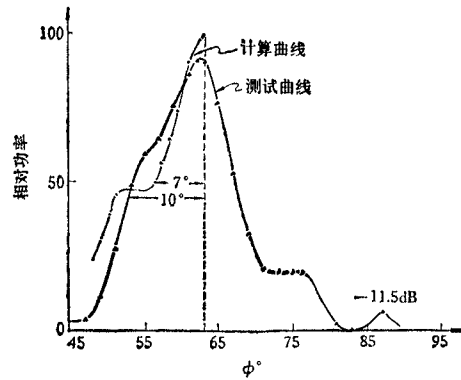


图6 等幅平方相位法
Fig. 6 Method of equal amplitude and square phase

(五) 小结

采用隙缝馈电方式设计的平面阵天线,经过测试性能达到了样机对天线的要求,但仍
有不足之处,需作进一步改进。例如: 馈电隙缝数目太少,使效率提不高。如何在隙缝数
较少的情况下提高效率,是今后要研究的问题。就目前波导原材料的质量,隙缝加工的精
度和隙缝电导测试的准确度来看,还不能满足精确控制平面阵口径分布的要求,尚有待解

决。此外, 介质移相器太长且功率容量不大, 需考虑用其他类型的移相器以增加功率容量, 并进一步缩短其长度。

参 考 文 献

- [1] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, Chapter 9 (1948).
- [2] A. З. Айзенберг 著, 毕德显等译, 超高频天线, 人民邮电出版社, 1961年。
- [3] 钟顺时, 西北电讯工程学院学报, 1976年, 第1期, 第165页。
- [4] H. T. Бова 著, 南京大学物理系无线电教研组译, 超高频天线, 高等教育出版社, 1959年。
- [5] J. L. Hilburn, *IEEE Trans. on AP*, **AP-20** (1972), 506.
- [6] G. W. Roffoul, *IEEE Trans. on AP*, **AP-22** (1974), 355.
- [7] 冯孔豫, 电子学通讯, **2** (1980), 95.

SLOT FEEDING PLANAR ARRAY ANTENNA

Tian Xianzu

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

The article describes a planar array with a slot feeding structure in x-band. The design of the slot linear array with rectangular waveguide and the radiation patterns (E plane and H plane) of the slot feeding planar array are discussed. It is not difficult to design an aperture distribution of the linear array, in order to obtain a specified vertical pattern by means of various slant angles of the slot and phase shifts of the phaser. The calculated and experimental results are also shown.