

雷达发射机功率合成效率研究

杜海旺 洪远刚 宋石玉

(中国卫星海上测控部, 江阴 214431)

摘要 功率合成器是雷达发射机的重要组件。应用散射参数理论对雷达发射机大功率合成器的合成效率进行了计算推导, 分析了影响合成效率的各种因素, 推导出合成效率所能达到的最大值, 给出最大合成效率的条件, 并在工程实际中进行了验证。

关键词 雷达发射机 功率合成器 合成效率 散射参数理论

中图分类号 TN959.5; **文献标志码** A

由于单个功放管或发射机的功率容量有限, 发射系统要达到较大的输出功率, 现在普遍采用大功率合成技术^[1]。目前功率合成技术采用的方法主要有管芯合成、电路合成及空间合成等, 它们均不可避免地要使用功率合成器^[2]。因此研究功率合成器的合成效率及其影响因素对大功率发射机的研制至关重要。现应用散射参数理论对雷达发射机功率合成效率进行了模型化推导, 研究了功率合成器合成效率的各种影响因素, 推导出其达到最大合成效率所需要的条件, 并在工程实际中进行了验证。

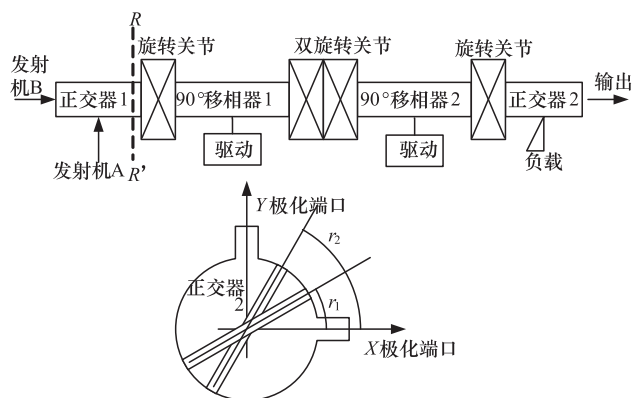


图1 功率合成器原理图

1 雷达发射机功率合成器简介

雷达发射机大功率合成器是将来自两台发射机的信号进行大功率合成的部件。它由正交器、旋转关节、90°移相器等组成, 其原理框图如图1所示。从正交器1的两个臂输入待合成的信号, 经分别设置一定角度两个90°移相器后, 就可实现两个输入信号在正交器2的一个臂中被同相合成, 而在另一个臂的输出为零, 这样就将两路信号进行大功率合成^[3]。

该功率合成器3种工作模式, 即发射机A单独工作, 发射机B单独工作, 发射机A+B功率合成工作3种模式^[3]。功率合成器的旋转驱动电机采用220V交流电源, 合成器的工作状态: A、B、A+B取决于两个旋转机构的旋转位置, 角度分别记为 α_1 和 α_2 , 给定不同的 α_1 和 α_2 组合, 就可得出不同的工作方式。

2 功率器合成效率分析

2.1 功率合成器效率模型化推导

雷达发射机功率合成器为4端口器件, 其中两输入端口分别与发射机A和发射机B相接; 其余端口为输出端口, 分别连接大功率负载和天线。根据散射参数理论, 可简化为图2所示的功率合成器网

2011年1月17日收到, 2月20日修改

第一作者简介: 杜海旺(1982—), 男, 工程师, 国防科技大学, 学士。
研究方向: 航天测控信道发射系统。E-mail: xingliyad@163.com。

络散射参数示意图。

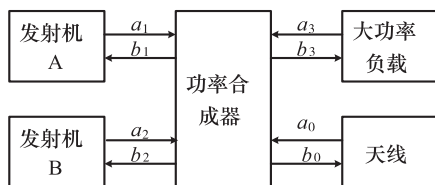


图2 功率合成器网络散射参数示意图

图2中左边是作为功率合成器待合成信号,即两套发射机输出信号,右边分别为大功率负载和天线。由于移相器不能将输入信号全部转化为横向信号,大功率负载起到吸收纵向电磁波的作用。每个端口的 a 和 b 分别表示相对于功率合成器的输入和输出的复数功率波。在特定频率下,根据散射参数理论,合成网络特性完全由一个4阶散射矩阵 S 决定^[4]。

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{01} & S_{02} & S_{03} & S_{04} \end{pmatrix}。$$

设输入信号分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_0 。根据散射参数理论,则:

$$b_0 = S_{01}a_1 + S_{02}a_2 + S_{03}a_3 + S_{00}a_0。$$

假设大功率合成器与连接的各器件均为匹配,即它们没有形成反射功率输入到合成器中,则: $a_3 = 0$; $a_0 = 0$

那么根据散射矩阵公式,合成器的输出信号为:

$$b_0 = S_{01}a_1 + S_{02}a_2。$$

定义输出功率与输入功率的比值为功率合成效率,即:

$$\eta = \frac{P_0}{P_1 + P_2} = \frac{|b_0|^2}{|a_1|^2 + |a_2|^2} = \frac{|S_{01}a_1 + S_{02}a_2|^2}{|a_1|^2 + |a_2|^2}。$$

2.2 功率合成效率的影响因素

输入功率合成器的信号波均有一定的幅度和相位,且散射矩阵也是复数矩阵,因此用幅度相位表示各分量^[5]。

输入信号:

$$a_1 = A_1 e^{j\psi_1};$$

$$a_2 = A_2 e^{j\psi_2}。$$

散射矩阵中部分相关元素分别为

$$S_{01} = C_1 e^{j\psi_1};$$

$$S_{02} = C_2 e^{j\psi_2}。$$

则合成器输出信号可以表示为

$$b_0 = S_{01}a_1 + S_{02}a_2 = C_1 A_1 e^{j(\psi_1 + \beta_1)} + A_2 C_2 e^{j(\psi_2 + \beta_2)}。$$

代入合成效率公式,则

$$\eta = \frac{|S_{01}a_1 + S_{02}a_2|^2}{|a_1|^2 + |a_2|^2} = \frac{|C_1 A_1 e^{j(\psi_1 + \beta_1)} + A_2 C_2 e^{j(\psi_2 + \beta_2)}|^2}{|A_1|^2 + |A_2|^2}。$$

由以上结果可以得出如下结论。

(1) 功率合成器的效率取决于输入信号的幅度和相位,同时也取决于合成器的散射矩阵各元素的幅度和相位。

(2) 输入信号相位相等并不一定能使合成效率达到最大值,而是要综合考虑其他各方面因素,包括合成器参数。合成器散射矩阵元素的幅度和相位是合成器内在的性质,它们取决于合成器的设计和制作。当合成器给定后,散射矩阵就已经给定,人为无法控制。工程人员唯一可以控制的就是一些外在因素,包括输入信号的幅度和相位。

2.3 合成效率最大值条件

仅仅改变信号幅度相位一致性不可能使合成效率达到最大值。对合成效率公式运用不等式公式^[6]

$$(ab + cd)^2 \leq (a^2 + c^2)(b^2 + d^2)。$$

则:

$$\eta = \frac{|C_1 A_1 e^{j(\psi_1 + \beta_1)} + A_2 C_2 e^{j(\psi_2 + \beta_2)}|^2}{|A_1|^2 + |A_2|^2} \leq \frac{(|A_1|^2 + |A_2|^2)(|C_1 e^{j(\psi_1 + \beta_1)}|^2 + |C_2 e^{j(\psi_2 + \beta_2)}|^2)}{|A_1|^2 + |A_2|^2} \leq$$

$$C_1^2 + C_2^2。$$

即合成器的合成效率所能达到的最大值是散射矩阵元素 S_{01} 、 S_{02} 实数系数的平方和,也就是正向传输函数幅度平方和,即

$$\max |\eta| = C_1^2 + C_2^2 = |S_{01}|^2 + |S_{02}|^2。$$

将不等式等号成立的条件代入公式,则可推出合成效率达到最大值的条件。

$$\begin{cases} A_1 = pC_1 \\ A_2 = pC_2; \end{cases} \quad \begin{cases} \beta_1 = \alpha - \psi_1 \\ \beta_2 = \alpha - \psi_2。 \end{cases}$$

其中 p 是一个任意的比例因子, α 是一个任意的相位角, 它们相互独立。从以上推导可知, 要达到合成效率的最大值, 必须是各输入信号的幅度与合成器传递函数的幅度成等比关系, 并且各输入信号相位与合成器传递函数相位的差相等, 即原来不同输入信号的相位通过合成器后, 相位达到了完全一致 (既各信号通过合成器后修正了相位)。实际上使两个输入信号幅度与合成器传递函数的幅度成比例关系, 相位一致后, 共同促成功率波的叠加顺利完成, 达到最大合成效率。

2.4 工程实际中功率合成器效率

一般最简单也是比较实用的情况是: 给定合成器各输入端口的对称的, 即:

$$S_{01} = S_{02}。$$

代入公式, 则

$$\max|\eta| = C_1^2 + C_2^2 = 2C_1^2 = 2|S_{01}|^2。$$

这时, 合成效率达到最大值的条件可以简化为

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ \beta_1 = \beta_2。 \end{cases}$$

问题简化为: 对于传递函数对称的功率合成器, 达到合成效率最大的条件是输入信号等幅同相。

我船雷达发射机所采用的功率合成器为传递函数对称的功率合成器, 即

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ \beta_1 = \beta_2。 \end{cases}$$

所以将功率合成器两入口信号调到等幅同相即能保证功率合成器合成效率最大。由于我船发射机功率合成器已经投入使用, 在出所测试阶段已经将功率合成器入口信号的相位值调至相等, 下面是通过实际数据来分析功率合成器输入信号幅度差对合成效率的影响:

表 1 信号幅度与合成效率的关系

幅度差 p/kW	0	50	100	150	200	250
合成效率 $\eta/\%$	96	95.7	94.9	93.3	90.8	87.3
合成损耗 L/kW	42	43	48	59	77	100

在实际中, 由于功率合成器存在端口不对称、合成器插损、匹配不理想的影响, 实际测得数据与理想公式存在一定差距, 但数据已充分验证了上述结论的正确性。

4 结束语

以上结论对于功率合成器研究, 及大功率发射机研制都有很大的借鉴意义, 但是同时应该考虑到以下几点情况。

(1) 合成器端口与输入输出端口不一定十分匹配, 这样在实际中就存在反射现象, 必然使合成效率下降。

(2) 输入端口之间也不是完全隔离, 输入信号在各端口之间传输, 必然减少传输到输出端口的信号功率, 也会使合成效率下降。

(3) 合成器各端口参数不可能完全对称, 但是只要幅度相位平衡达到一定条件时, 可以当作对称条件来考虑, 以简化功率合成中调整量。

(4) 调节所有的输入信号幅度相位满足最大值合成条件的要求。在实际工程中, 相位失配比幅度失配对效率的影响要大, 一般原则是先考虑调整相位, 然后在综合考虑幅度匹配, 这样就能够得到实际合成效率的最大值。

参 考 文 献

- 1 Gupta S. Degradation of power combining efficiency due to variability among signal sources. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992; 40(5): 12—15
- 2 Maurin D, Wu K. A compact 1. three way power combiner using microstrip technology with better than 93. 8% combining efficiency. IEEE Microwave and GUIDED Wave Letters, 1996; 6(2): 19—21
- 3 电子科技集团第三十九研究所. TC-4301/ML-3103/TS-4203 天伺馈分系统监控子系统方案设计报告, 2006; 46(2): 87—89
- 4 朱 强, 周东方, 等. 功率合成与分配网络的混合模式 S 参数分析方法. 信息工程大学学报, 2003; 4(2): 27—29
- 5 严志刚. 射频功率合成技术. 内蒙古广播与电视技术, 2003; 4(2): 30—33
- 6 项 钟, 程诗叙. 大功率固态功放合成效率研究. 电讯技术, 2007; 47(1): 45—46

Laser Orientation and Tracking Based on Multi-sensor information Fusion

SHI Bai-xin, CHEN Zhi-gang, YU Su-hua, HUANG Li-zhi, YING Hai-jue

(College of Physics & Electronic Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, P. R. China)

[**Abstract**] In order to achieve more precise orientation and tracking for long-distance laser, twelve PIN silicon photodiode chips detector and a precision four-quadrant photo-detector with optical system compose novel multi-sensors dimensional configuration. The application of space angle-measuring basic theory and multi-sensor information fusion algorithm based on Bayes principle realize rough and precise location in 10 km distance in free space and realize precise tracking by controlling three-dimensional high-precision rotary table using orientation information. The experiment results show that based on rough location, it is proved that precise location angle accuracy is less than 3mrad.

[**Key words**] PIN four-quadrant photo-detector artificial neural networks multi-sensor Information fusion

(上接第 3301 页)

A Study on Power Combining Efficiency of Radar Transmitter

DU Hai-wang, HONG Yuan-gang, SONG Shi-yu

(China Department of Satellite Marine Track & Control, Jiangyin 214413, P. R. China)

[**Abstract**] The power synthesizer is an important part of the radar transmitter. The power combining efficiency of the radar transmitter is analyzed by scatter parameter. Some factors effecting the power combining efficiency are discussed, and the max efficiency and its condition are deduced. And the max efficiency and its condition are validated in the actual projection.

[**Key words**] radar transmitter power synthesizer combining efficiency scatter parameter