

# 有源相控阵雷达 T/R 组件稳定性分析设计

於洪标

(天线与微波技术国防科技重点实验室, 江苏南京 210013)

**摘要:** T/R 组件是有源相控阵雷达的关键部件, 其设计的成功与否, 决定了整部雷达的成本、可生产性和系统性能。针对以往组件系统设计师在设计时缺乏考虑系统稳定性设计的情况, 本文从组件系统角度出发, 首次提出了 T/R 组件的环路稳定性设计问题, 并从噪声功率角度对环路进行了理论分析, 推导出满足系统稳定的设计方程, 最后提出了 T/R 组件环路稳定性的系统解决方法。

**关键词:** T/R 组件; 噪声功率; 增益; 隔离度

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2005) 06 1102-03

## Stability Analysis and Design of T/R Module in Active Phased Array Radar

YU Hong-biao

(National Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

**Abstract:** T/R modules are the key parts of the active phased array radar. Their design decides the cost, feasibility and the system performance of the whole radar. As the designer usually didn't attach much importance to the stability of the module system, this paper firstly brought forward the stability design of the loop in T/R module system, then its theoretic analysis is made in the case of noise power and the design function to meet the system stability is deduced, finally, several system design methods to solve the problem are suggested.

**Key words:** T/R module; noise power; gain; isolation

### 1 引言

在现代雷达技术中, 相控阵雷达, 特别是有源相控阵雷达占有十分重要的地位, 其中 T/R 组件是整个雷达的关键部件之一。T/R 组件的研制成本、稳定性和可靠性决定了整个雷达研制的周期、造价和可靠性指标, 因此 T/R 组件的设计成为各雷达系统设计师关注的焦点。

目前许多雷达 T/R 组件系统设计师在组件设计过程中, 往往只注重总体提出的几个关键技术指标, 如收发通道增益, 接收通道噪声系数, 发射功率, 收发幅相一致性等, 而忽略了组件稳定性的设计, 而这一指标恰恰决定了组件工程应用的成败, 特别是当工作频率在 C 波段以上时, 组件通常采用 GaAs FET 或 PHEMT 有源器件来实现其高频特性, 而这些器件基本都工作在 A 类或 AB 类状态, 因而组件的稳定性设计显得尤为重要。

### 2 T/R 组件构成和工作原理

目前最常用的 T/R 组件的原理框图如图 1 所示, 它由发

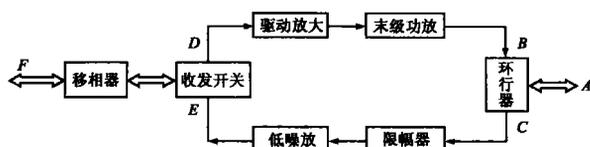


图 1 T/R 组件原理框图

射(T)通道、接收(R)通道和公用通道组成。

发射信号由 F 端口输入, 经移相器移相后, 通过收发开关至发射通道驱动放大, 再经末级功放放大后由环形器输出。接收信号由 A 端口输入至环形器经限幅器、低噪声放大器放大后由收发开关至移相器移相后再输出, 其中限幅器起着发射期间保护接收通道的作用。由于雷达是收发同频工作, 因此必须采用时分(TD)工作的模式来实现收发隔离。

### 3 T/R 组件稳定性分析

正如前面所述, 通常 T/R 组件设计师在进行系统设计时往往只考虑如何满足总体提出的技术指标, 当然也会考虑发射电路和接收电路本身稳定性的设计, 但通常忽略了整个 T/R 组件的系统稳定性的问题。从图 1 中可以看到, 收发通道 BCED 构成一个闭环回路, 众所周知, 对于闭环回路就会存在不稳定的可能。由于雷达以时分方式工作, 往往会给 T/R 组件系统设计师造成一种错觉, 认为发射时接收不工作, 接收时发射不工作, 系统不会有什么问题, 而忽略了噪声的作用。实际上只要电路一工作, 再加上收发通道隔离度不够, 系统噪声就有可能通过上述环路形成正反馈造成系统不稳定, 下面从噪声功率的角度来讨论系统收发隔离度满足稳定工作的条件。

假定 T/R 组件两端口端接噪声温度分别为  $T_{ra}$  (F 端口) 和  $T_{ri}$  (A 端口) 噪声源, 且相应端口的回波损耗分别为  $L_{ra}$  和  $L_{ri}$ , 端口 F 至发射通道输入口 D 间的有功损耗为  $L_{T1}$ , 环形器

损耗为  $L_{r1}$ , 收发通道带宽为  $B$ . 则发射通道输入口  $D$  的外部噪声输入功率  $N_{\dot{u}1}$  为<sup>[1-3]</sup>:

$$N_{\dot{u}1} = KB \left[ T_{t\dot{a}} \left( \frac{1}{L_{t1}} - \frac{1}{L_{t1} \cdot L_{t\dot{a}i}} \right) + T_0 \left( 1 - \frac{1}{L_{t1}} \right) \right] \quad (1)$$

为便于后面分析, 我们令

$$T_{t\dot{a}} = T_{t\dot{a}i} \left( \frac{1}{L_{t1}} - \frac{1}{L_{t1} \cdot L_{t\dot{a}i}} \right) + T_0 \left( 1 - \frac{1}{L_{t1}} \right) \quad (2)$$

为发射通道输入端接外部等效噪声温度. 假定 T/R 组件内部匹配良好, 则发射通道的等效输入噪声温度  $T_{st}$  为:

$$T_{st} = T_{t\dot{a}} + (F_t - 1)T_0 \quad (3)$$

式中  $F_t$  为发射通道噪声系数, 则发射通道等效输入噪声功率  $N_{\dot{u}i}$  为:

$$N_{\dot{u}i} = KT_s B = KB [ T_{t\dot{a}} + (F_t - 1)T_0 ] \quad (4)$$

发射通道总输出噪声功率为  $N_{\dot{u}o}$ :

$$N_{\dot{u}o} = G_t N_{\dot{u}i} = G_t KB [ T_{t\dot{a}} + (F_t - 1)T_0 ] \quad (5)$$

式中  $G_t$  为发射通道增益, 假定环形器 BC 端口间隔高度为  $I_i$ , 则由发射通道泄漏至接收通道的噪声功率  $N_{ri1}$  为:

$$N_{ri1} = \frac{N_{\dot{u}o}}{I_i} = \frac{G_t}{I_i} KB [ T_{t\dot{a}} + (F_t - 1)T_0 ] \quad (6)$$

接收通道输入口  $C$  的外部噪声输入功率  $N_{ri2}$  为:

$$N_{ri2} = KB \left[ T_{r\dot{a}i} \left( \frac{1}{L_{r1}} - \frac{1}{L_{r1} \cdot L_{r\dot{a}i}} \right) + T_0 \left( 1 - \frac{1}{L_{r1}} \right) \right] \quad (7)$$

为便于后面分析, 我们令

$$T_{r\dot{a}} = T_{r\dot{a}i} \left( \frac{1}{L_{r1}} - \frac{1}{L_{r1} \cdot L_{r\dot{a}i}} \right) + T_0 \left( 1 - \frac{1}{L_{r1}} \right) \quad (8)$$

为接收通道输入  $C$  端接外部等效噪声温度, 则接收通道的等效外部输入噪声功率  $N_{ri2}$  为:

$$N_{ri2} = KT_{ra} B \quad (9)$$

发射通道至环形器由于  $A$  端口反射到接收通道的输入噪声功率  $N_{ri3}$  为:

$$N_{ri3} = \frac{N_{\dot{u}o}}{L_{r1} \cdot L_{r\dot{a}i} \cdot L_{r1}} = \frac{N_{\dot{u}o}}{L_{r1}^2 \cdot L_{r\dot{a}i}}$$

令

$$L_{ra} = L_{r1}^2 \cdot L_{r\dot{a}i}$$

则

$$N_{ri3} = \frac{N_{\dot{u}o}}{L_{ra}} \quad (10)$$

接收通道输入端  $C$  总的噪声功率  $N_{ri}$  为:

$$\begin{aligned} N_{ri} &= N_{ri1} + N_{ri2} + N_{ri3} + KT_0(F_r - 1)B \\ &= \frac{N_{\dot{u}o}}{I_i} + \frac{N_{\dot{u}o}}{L_{ra}} + KT_0 B + KT_0(F_r - 1)B \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $F_r$  为接收通道噪声系数, 假定接收通道增益为  $G_r$ , 则接收通道总的输出噪声功率  $N_{\dot{u}}$  为:

$$N_{\dot{u}o} = G_r \cdot N_{ri} = G_r G_t \left[ \frac{1}{I_i} + \frac{1}{L_{ra}} \right] N_{\dot{u}i} + G_r KB [ T_{ra} + (F_r - 1)T_0 ] \quad (12)$$

若收发开关隔离度为  $I_s$ , 则由接收通道泄漏至发射通道输入端  $D$  的噪声功率  $N'_{\dot{u}}$  为:

$$N'_{\dot{u}i} = \frac{N_{\dot{u}o}}{I_s} = G_r G_t N_{ri} \left[ \frac{1}{I_i} + \frac{1}{L_{ra}} \right] / I_s + G_r KB [ T_{ra} + (F_r - 1)T_0 ] / I_s \quad (13)$$

令  $\alpha = G_r G_t \left[ \frac{1}{I_i} + \frac{1}{L_{ra}} \right] / I_s$ ,  $\beta = G_r KB [ T_{ra} + (F_r - 1)T_0 ] / I_s$

$\alpha$  为发射通道噪声反馈回发射通道的反馈系数,  $\beta$  为接收通道耦合到发射通道的噪声功率.

则式(13)变为  $N'_{\dot{u}i} = \alpha N_{\dot{u}i} + \beta$  (14)

此时发射通道合成输入噪声功率  $N_{\dot{u}i1}$  为:

$$N_{\dot{u}i1} = N_{\dot{u}i} + \alpha N_{\dot{u}i} + \beta$$

这样的循环一直进行下去, 每次增加的噪声功率又反馈回去, 最后发射通道合成输入噪声总功率  $N_{tic}$  为:

$$N_{tic} = N_{\dot{u}i} + (\alpha N_{\dot{u}i} + \beta)(1 + \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \dots + \alpha^n), \quad n \rightarrow \infty \quad (15)$$

为保证系统的稳定工作, 则要求式(15)收敛, 也就要求级

数  $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n$  收敛, 根据级数收敛的达兰尔判别

法, 当  $q = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\alpha^{n+1}}{\alpha^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha = \alpha < 1$  时, 该级数收敛, 因此系

统稳定的条件为  $\alpha = G_r G_t \left[ \frac{1}{I_i} + \frac{1}{L_{ra}} \right] / I_s < 1$

即  $G_r G_t < I_s I_i \left[ \frac{L_{ra}}{I_s + L_{ra}} \right]$  (16)

考虑到系统噪声的相关性<sup>[4]</sup>和级数收敛的速度, 我们将上面不等式右边乘上一个小于 1 的系数  $k$ , 则上式变为

$$G_r G_t < I_s I_i \left[ \frac{L_{ra}}{I_s + L_{ra}} \right] k, \quad k \leq 1 \quad (17)$$

令  $D = k \frac{L_{ra}}{I_s + L_{ra}}$  (18)

称为隔离因子或隔离容限. 如果用分贝来表示, 式(17)变为:

$$I_t[\text{dB}] + I_s[\text{dB}] > G_r[\text{dB}] + G_t[\text{dB}] - 10 \lg D \quad (19)$$

下面分两种特殊情况来分析

(a) 若 T/R 组件两端口(A, F)匹配良好, 那么

$$L_{t\dot{a}i} \rightarrow \infty; L_{r\dot{a}i} \rightarrow \infty; L_{ra} \rightarrow \infty$$

则

$$D = k$$

(b) 若 T/R 组件两端口(A, F)端接噪声温度为  $T_0$  的噪声源且匹配良好, 那么

$$L_{t\dot{a}i} \rightarrow \infty; L_{r\dot{a}i} \rightarrow \infty; L_{ra} \rightarrow \infty; T_u = T_{ra} = T_0$$

则

$$D = k$$

对单独的 T/R 组件来说, 可认为它工作在  $b$  状态, 对接入系统的 T/R 组件可认为它工作在  $a$  状态.

从式(17)可以看出  $D$  一定是小于等于 1 的, 因此式(19)等式右边最后一项一定小于等于 0, 因此就要求我们在系统设计时保证 T/R 组件环路隔离度大于收发通道增益和, 具体大多少决定于隔离因子  $D$ , 通常我们可以取  $k$  为 0.5 或更小.

上面的分析过程假定了收发通道的带宽是相同的, 如果两者不同, 那么在分析过程中要考虑不同带宽带来的影响, 在此不作进一步的分析, 有兴趣的读者可自行推导.

#### 4 T/R 组件稳定性设计

上面已经分析给出了环路稳定工作的必要条件, 但在系统设计中如何采取措施来提高收发隔离度是每个设计师必须要考虑的. 下面针对不同频段不同类型的 T/R 组件, 分别阐述提高组件隔离度的常规设计方法.

### (a) C 类功放构成的 T/R 组件的设计

工作在 S 波段及其以下的组件, 往往要求组件输出功率较大, 因此组件的发射通道通常采用硅工艺制造的功率晶体管, 功放工作在 C 类. C 类功放的工作特点是导通角大, 因而只有当一定大的激励信号输入时, 功放才工作, 小信号激励功放是截止的. 如果发射通道采用大功率激励的话(常采用 PIN 管移相器), 那么发射通道的增益就不会太大, 而环形器和收发开关的隔离度在这个频段可以做得很好. 由于接收通道往往是不断电连续工作的, 因此设计师要注意的是当发射导通工作时, 必须使得环路增益和隔离度满足式(15)的要求. 幸运的是, 在这个频段, 可以轻而易举地选到合适的开关和隔离器来满足系统要求. 这也就使得以往的组件系统设计在不考虑环路稳定性设计时也能使得组件满足工程使用要求的原因.

### (b) A 类或 AB 类功放构成的 T/R 组件的设计

这类组件由于工作频率较高, 天线单元间距的限制使得系统对组件的尺寸要求很苛刻, 而组件输出功率一般不大于 10W, 因此均采用 GaAs FET 或 PHEMT 有源器件来实现其高频特性. 设计师往往使这类器件在发射时处于 AB 类工作状态, 因此同上面组件的发射电路不同, 即使无激励信号, 发射通道也处于工作状态, 再加上采用的 GaAs FET 器件移相器相对损耗较大, 就使得组件的系统增益非常高, 而开关和隔离器在这个频段的隔离度不可能太高, 因此如果只通过器件的选择是很难满足收发隔离要求的. 设计师除了选择合适的器件外, 还必须另外采取措施来提高系统隔离度, 一般可通过 T/R 波控来实现.

组件系统设计师为提高效率, 通常对发射通道功放电路进行脉冲调制, 这样使得组件在发射以外的工作期间的收发隔离度得以提高, 但在发射期间隔离度没有改善, 因此为提高整个工作期间的收发隔离度, 必须在发射期间关断接收通道, 并且两者的控制时序不能有交叉, 即发射控制上升沿和接收控制下降沿不能有交叉, 且要求发射导通时间  $T_i$  小于接收截至时间  $T_r$ , 如图 2 所示.

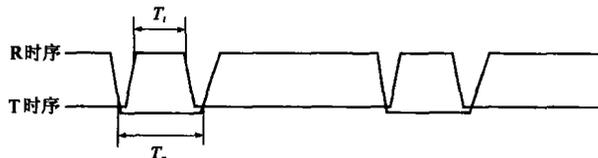


图 2 正确的收发控制时序图

如果采用了图 3 所示的不合适的收发时序, 即发射导通时间  $T_i$  等于或小于接收截至时间  $T_r$ , 发射控制上升沿和接收控制下降沿有交叉, 这样收发通道就有可能存在瞬间收发隔离不够的可能, 从而使得系统存在不稳定的隐患.

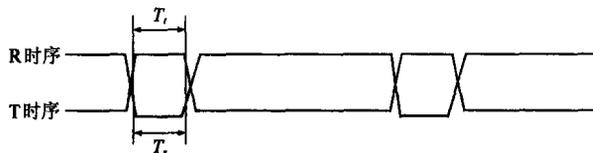


图 3 不正确的收发控制时序图

## 5 结论

通过上面的分析, 我们可以看到 T/R 组件系统稳定性的设计是对组件设计师新引入的概念, 特别在高频频段的组件设计中, 要引起足够的重视. 另外除了上面提到的设计方法外, 在 T/R 电路设计过程中要注意空间隔离, 电源和控制线的滤波隔离, 只有这样才能提高组件设计的成功率, 缩短研制和调试周期, 降低研制成本, 提高雷达阵面的可靠性和整机的稳定性.

### 参考文献:

- [1] Bernard Sklar. 数字通信——基础与应用(第二版)[M]. 徐平平, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 207-213.
- [2] Friis H T. Noise figure of radio receivers[J]. Proc IRE, July 1944, 32(7): 419-422.
- [3] IRE Subcommittee 7.9 on Noise, H A Haus, et al. Description of the noise performance of amplifiers and receiving system[J]. Proc IEEE, Mar 1963, 51(3): 436-442.
- [4] A Waldman, G J Wooley. Noise temperature of a phased array receiver[J]. The Microwave Journal, Sep 1966, 9(9): 89-96.

### 作者简介:

於洪标 男, 1965 年 11 月出生于江苏省江阴县, 1986 年毕业于北京工业学院电子工程系, 1989 年毕业于南京电子工程研究中心, 获硕士学位、研究员, 中国电子学会高级会员、总装备部电子元器件型谱监理专家、江苏省科技成果鉴定专家, 目前主要从事雷达接收机、通信用收发信机、T/R 组件、微波有源和无源电路的研究工作, 在国内外会议期刊上发表论文多篇、获部省级科技成果进步奖多项. E-mail: ssyhb@yahoo.com.cn.