

双波段双极化复合式 T/R 组件仿真和设计

李 钊

(中国电子科技集团公司第29研究所 成都 610036)

摘要:介绍了一种 S 波段和 X 波段双波段复合式双极化 T/R 组件的研制方法和关键技术。该 T/R 组件两种波段接收和发射,而每个接收和发射各有 2 个通道,总共 8 个收发通道。对在较小的空间内实现多个波段的多路收发所带来的工作通道的复杂性以及由此带来的互不干扰的电磁兼容性和散热设计进行了分析和阐述,同时,在每个波段的发射通道上加入 Lange 电桥,使得每个波段的 2 个发射通道的相位相差 90° ,可以使该组件实现双极化发射。测试结果表明该 T/R 具有组件双频带、高功率发射、双极化、体积小等特性。

关键词: T/R 组件; S 波段; X 波段; 双极化

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.14035

Simulation and design of double waveband and dual-polarized composite T/R module

Li Zhao

(Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper introduces the design and key technologies of S-band and X-band dual-polarized T/R module, T/R module has two kinds of transmitting channel and receiving channel wave band, each transmitting channel and receiving channel each have two passage, totally has eight passage. Multi-channel transceiver of multiple bands in a small space work arising from the complexity of the channel and the resulting electromagnetic compatibility design and heat dissipation interfering analyzed and explained, while adding Lange bridge on each band transmission channel, so that the phase of each band of two transmitting channels of 90° displacement, the component can realize the dual polarization transmission. Test result enunciation should the T/R have double waveband, big power transmitting, dual-polarized and the physical volume small characteristic.

Keywords: T/R module; S-band; X-band; dual-polarized

1 引言

相控阵雷达利用成百上千个的微小 T/R 组件排列成不同尺寸大小的天线阵面。相控阵雷达可以实现波束快速扫描、波束赋形、多个独立波束可同时实现多个目标的搜索和跟踪,同时具有较强的复杂电磁环境的适应能力和较强的抗干扰能力^[1-3]。这成百上千个 T/R 组件都由独立的开关控制,通过控制各自末级独立的天线进行功率发射的时间差,波束就能在不同相位合成,同时可以形成多个独立的波束,并且通过独立的开关控制能使每个波束以不同的幅度值出现^[4]。在 X, Y 两个轴向上进行相位变化,而天线的波束旁瓣则由于干涉相减而大幅减小,有着良好的电磁兼容性能,每个雷达阵面的 T/R 组件单元数量和雷达的用途和所需的发射功率有关,可以从几十个到几万个不等^[5]。

因此,雷达系统对 T/R 组件的体积和能耗有着极为苛刻的要求,同时 T/R 组件排列的天线阵面的散热能力也直接制约着发射功率的大小,实现有着良好散热能力的小型化 T/R 组件具有相当重要的现实意义。

本文设计了一种双波段(S 波段和 X 波段)小型复合式 T/R 组件,在极小的空间里使得 2 个波段信号互不干扰的进行收发,极其考验电磁兼容性的设计,也大大地压缩了 T/R 组件的体积。

2 系统方案

该 T/R 组件为 S/X 双波段复合式 T/R 组件。在系统收发时序的控制下,对天线接收的 S 波段和 X 波段信号进行限幅、滤波、低噪声放大等初级处理;并将后端送来的 S 和 X 2 个波段的干扰激励信号,在波段和极化方式的控制

下,实现线极化和圆极化发射^[6-7]。

在结构上,根据实际情况,可以将 T/R 组件采用微波混合集成在一起,但是需要重点考虑热传导和电磁兼容的问题。在方案上设计方面,在满足指标技术指标要求的情况下,尽可能功能实现方式简化,降低通道中的功率损耗。

该 T/R 组件工作频率范围:2.8~3.5 GHz(S 波段)、8~12 GHz(X 波段),每个波段接收和发射各有两个通道,总共 8 个收发通道。接收通道增益大于 11 dB,总共 4 个接收通道;每个发射通道输出功率大于 10 W,总共 4 发射通道,通过 Lange 电桥实现双极化发射。

在发射信号时,发射两路相位要求相差 90°输出通过 Lange 电桥实现,在 1~18 GHz Lange 电桥本身的 0°和 90°相位比较时的偏差在 ±3°以内,不同的 Lange 电桥之间的相位偏差在 ±3°以内,计算得出 1~18 GHz Lange 电桥总偏差在 ±6°以内,满足指标要求的 ±10°以内。

在接收信号时,信号通过接收天线接收进入到 T/R 组件的接收通道中,首先要进行限幅保护,目的是对外部的大功率信号和发射时的大功率信号泄漏到接收端进行限幅保护,主要目的是保护接收通道中后级的低噪声放大器不被大功率信号进入输入端烧毁^[8]。在限幅器的后级是低噪声放大,这时要选用噪声尽量低的低噪声放大器,可以使得整个通道的噪声降至最低,最后放大后输出。

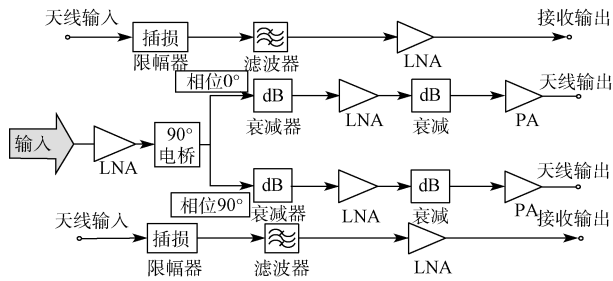


图 1 T/R 组件组成原理框图

除上述工作方式外,该分机还可实现对功率放大器电源 standby 功能,为了避免发射时对接收通道的影响,在低噪声放大后,采用单刀单掷开关切断发射泄漏信号以增强信号的空间隔离。

3 工作时序

该 T/R 组件要实现 4 个接收通道和 4 个发射通道的切换,控制信号 standby1 控制切换通道信号,当发射时,控制信号 standby1 控制开关使得接收通道断电,此时接收通道关断,同时控制信号 standby2 控制发射通道末级功率放大器正电源通电,发射通道输出功率。当处于接收状态时,控制信号 standby1 控制使接收通道通电,此时接收通道工作,同时控制信号 standby2 控制发射通道末级功率放大器正电源断电,发射通道关断。利用控制信号 standby1, standby2 控制 T/R 组件接收和发射电源的开断。控制信

号 standby1, standby2 有效时,即 standby1, standby2 为高电平,通道通电;控制信号 standby1, standby2 无效时,即 standby1, standby2 为低电平,通道断电。

T/R 组件要实现 0°和 90°两路发射中的一路发射,同时另一路关断的转换,切换有控制信号 T2 控制,当控制信号 T2 为高电平时,其中 0°发射通道的功率放大器正电源通电从而 0°的发射通道有大功率输出,90°发射通道的功率放大器正电源断电从而 90°的发射通道无大功率输出;当 T2 为低电平时,其中 0°发射通道的功率放大器正电源断电从而 0°的发射通道无大功率输出,90°发射通道的功率放大器正电源通电从而 90°的发射通道无有大功率输出。

4 结构形式

由原理框图可知,该 T/R 组件其特点是体积小,重量轻,高可靠性,多频段多通道发射,同时因为体积小,发射输出端距离接收端空间距离太近,容易将发射信号耦合到输入端中,从而影响真实信号的接收,所以如何布局输入端口和输出端口的位置也是该 T/R 组件要考虑的。该系统要求 T/R 组件要在非常有限的体积里满足高集成度,多频段,多通道发射,重量轻,散热好,高可靠性等一系列要求。T/R 组件有 4 个接收通道和四个发射通道,在设计通道时,为减小损耗,尽可能缩短传输线的长度。2 个发射通道的放大链增益都比较高,在布局时还应考虑两个通道的耦合影响,同时应考虑发射功率放大器的散热,射频信号通过电缆相连接。

5 散热设计

T/R 组件由于有大功率发射,所以需要散热设计,特别是众多的 T/R 组件一起构成雷达阵面,根据雷达阵面所使用的 T/R 组件数量,T/R 组件的散热设计可分为:自然冷却、强迫风冷和强迫液冷^[9]。自然冷却使用在极少数量的 T/R 组件上,这时的 T/R 组件发热量较小,发热源通过导热把热量传导给壳体,再由壳体通过对流和辐射将热量传至周围介质(如空气),使组件达到冷却的目的。强迫风冷使用在数量较多的 T/R 组件上,这时的 T/R 组件发热量较大,无法自然冷却,只能通过强迫灌入冷风,用冷风将多余的热量带走从而使组件达到冷却的目的,但是强迫风冷需要良好系统结构设计,使得系统风冷通道的风阻减到最小,这样才能使冷却效果达到最高。强迫液冷使用在数量极多的 T/R 组件上,这时的 T/R 组件的热量采用强迫风冷的方式已经无法满足散热的需求,只能采取传导系数和热均比风冷更大的液冷来满足组件对冷却的需求。由于液冷的导热系数比风冷大,因此可以很大程度上可以减少各个部位的热量交换的阻抗。该 T/R 组件使用自然冷却的方式,同时在发热量最大的发射通道加装散热冷却底板,以帮助壳体传导热量,形成一条低阻热的通道,使组件冷却,这样做的好处是冷却成本低,高可靠性。

6 电磁兼容性设计

该 T/R 组件是多频段、高功率、体积小、高隔离的组件,考虑到在较小的体积内要实现多个频段的接收和发射,而且要求相互之间的干扰要小,各通道的隔离度都要大于 70 dB,因此电磁兼容的设计尤为重要。度要对干扰源或感受器(敏感设备、电路或组件)进行屏蔽,能有效地抑制干扰并提高电子系统或设备的电磁兼容性。因此,电磁兼容性设计是电子设备结构和系统设计时必须考虑的重要内容之一。

在 T/R 组件设计时,应注意以下措施:1)应将不同频段的部分用激光封焊盖板隔离,使其屏蔽结构连续没有缝隙达到最大的屏蔽效果,如果屏蔽结构连续,那电磁波只能通过壳体穿进和穿出,选择适当的壳体厚度和完全密封的壳体是可以获得很大的屏蔽效能,从而可以减少不同频段之间的影响,提高电磁兼容性^[10];2)在不同频段的通道内增加带通滤波器,带通滤波器乐意将带外的抑制做到最高,以防止带外的信号窜入通道影响真实信号的处理,以此可增加对其他频段的隔离,以提高电磁兼容性;3)同频段的收发通道通过增加各通道单独的内盖板以提高通道的隔离,单独的内盖板因为需要调试不能使用激光封焊,采用螺钉固定方式,屏蔽的效果不如激光封焊,但也能在各个通道之间起到一定的屏蔽效果,进而提高电磁兼容性;4)相邻发射通道的电磁兼容性通过控制末级功放的栅极电压的开关来提高,当功放栅极电压关断,该通道的增益会下降 60 dB 左右,对电磁兼容起着良好的帮助。5)通道内增益高的局部通道需要增加吸波材料来降低反射率,防止因温度变化引起通道自激^[11];6)组件内所有的引线采用双绞线,双绞线具有良好的抗干扰性能,使用可以提高电磁兼容性^[12];7)功放馈电及内部电源部分全部采用滤波电容,滤波电容可以减小 T/R 组件内部所有电源线和控制线的电磁串扰,可以提高电磁兼容性^[13];8)良好的系统接地也可以提高系统的电磁兼容性,电路设计时应该有多点接地,防止大的信号环路面积,大的信号环路会使通过这个环路的辐射电流增加从而带来的电磁干扰。

7 通道设计

7.1 接收通道设计

接收通道最主要考虑的是通道增益,1 dB 压缩点和噪声系数。选用限幅器、带通滤波器和低噪声放大器构成接收通道,第 1 级为大功率限幅器,第 2 级为带通滤波器,第 3 级为低噪声放大器,其中带通滤波器属于无源器件,通过仿真软件设计所得曲线如图 2 和 3 所示。

通道增益,1 dB 压缩点是通过选取合适的低噪声放大器得到,而接收通道噪声系数是通过公式计算得到^[14]。

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{NF_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}} \quad (1)$$

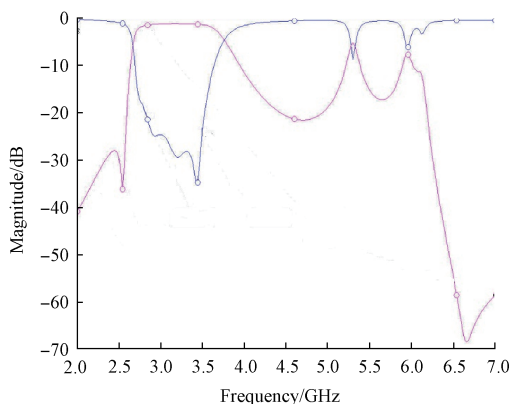


图 2 S 波段带通滤波器仿真曲线

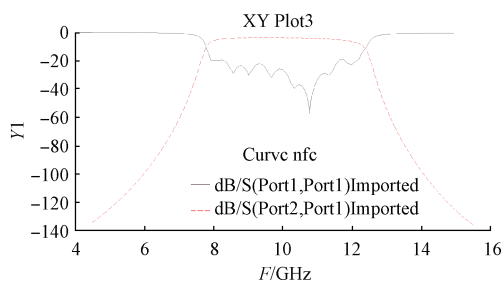


图 3 X 波段带通滤波器仿真曲线

式中: NF_n 为第 n 级的噪声系数; G_n 为第 n 级的系统增益。

7.2 发射通道设计

先选用用于 T/R 组件的接收放大和发射链路的信号放大的低噪声放大器,再级联有 90° 相位偏移量的 Lange 电桥,后级级联根据末级功率放大器对驱动功率的要求采用的驱动放大器,末级输出大于 10 W (40 dBm) 的功率放大器,其中驱动放大器的增益一般比较大,使得整个通道的增益会很高,增益太高会引起整个通道自激,所以要考虑选择增益合适的驱动放大器,同时要考虑末级的功率放大器会对整个发射通道的影响最大^[15]。

发射时最主要的功率、散热和静噪,散热有增加散热条件,静噪由选用的器件通过公式计算得出。

$$F = -114 \text{ dBm/MHz} + NF + G_T + 10 \log B_R \quad (2)$$

式中: F 为发射通道静噪; NF 为发射支路噪声系数; G_T 为发射支路的总增益; B_R 为射频带宽。

8 测试结果

根据上述分析,成功研制出该 T/R 组件,该组件输出功率最小值都为 43 dBm,远大于设计值的 40 dBm,接收通道的带外抑制也很出色,驻波也都低于 2,该 T/R 组件性能优越尺寸很小,在小空间内两个波段的接收和发射通道互不影响,证明了电磁兼容性设计也很出色。

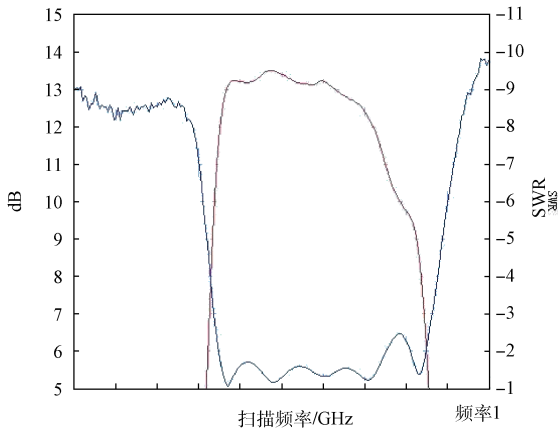


图 4 S 波段接收通道测试曲线

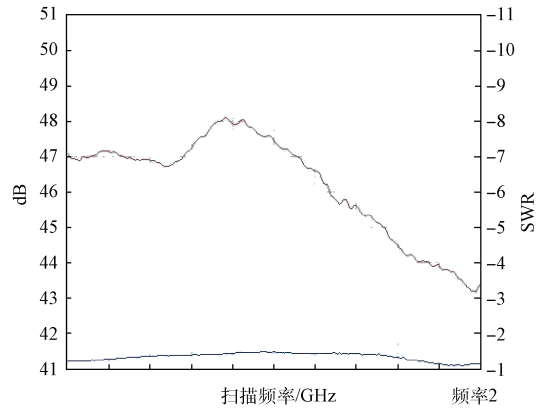


图 7 X 波段发射通道测试曲线

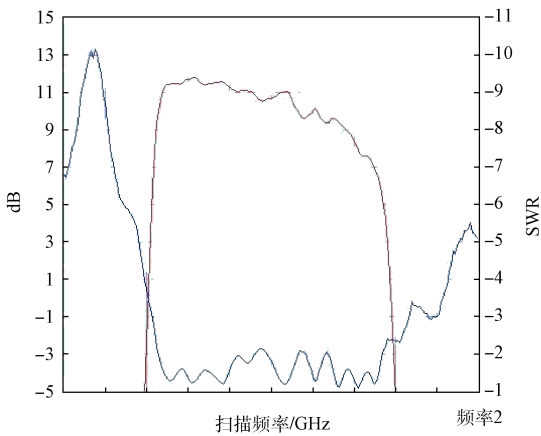


图 5 X 波段接收通道测试曲线

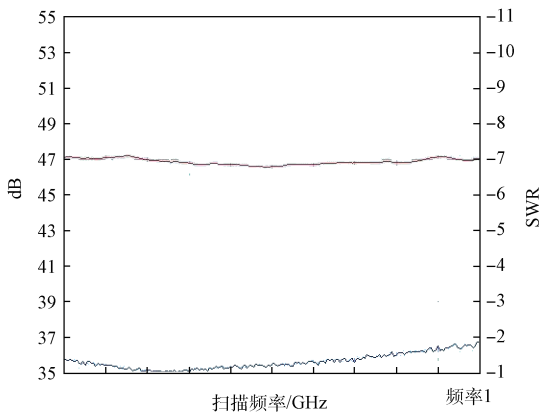


图 6 S 波段发射通道测试曲线

件具有重复性好、工艺可控制等特点，可以满足相关应用系统的要求。

参考文献

- [1] 李卫红,蔡金元,王玉田,等. 机载有源相控阵雷达的作战优势、性能对比及军事应用[J]. 国防科技, 2015, 36(6): 69-73.
- [2] 尹武,周继宇,单俊涛. 一种改进的自适应波束赋形算法[J]. 无线电通信技术, 2012, 38(4): 48-50.
- [3] 韩晓东,谭智,舒汀,等. 复杂电磁环境下有源相控阵雷达导引头抗干扰试验与效能评估技术研究[J]. 制导与引信, 2014, 35(3): 1-5.
- [4] 张富东,徐利梅,陈敏,等. 幅度加权相控参量阵波束合成方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 429-436.
- [5] 邹佳龙,姚元,王建明. 相控阵 MIMO 雷达最佳子阵数目估算方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 65-68.
- [6] 李南京,冯引良,王建飞,等. 利用线极化天线快速测量圆极化天线轴比的方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2216-2220.
- [7] 俞健,赵杰. 远场暗室条件下圆极化天线增益不同测试方法分析研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 34-41.
- [8] 刘建勇,陈军,郑林华,等. 一种用于 P 波段小型化 T/R 组件的限幅器设计实现[J]. 电子技术, 2005, 15(4): 56-59.
- [9] 任恒,刘万钧,洪大良,等. 某相控阵雷达 T/R 组件热设计研究[J]. 火控雷达技术, 2015, 44(4): 60-64.
- [10] 葛欣宏,宁飞,贺庚贤,等. 星载大容量固态存储器 EMI 辐射测试与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 569-576.
- [11] 郭高凤,周杨,李恩,等. 吸波材料反射率变温测试系统研制[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1009-1014.

(下转第 126 页)

9 结 论

通过测试结果可以看出,采用本文中设计思路和设计方法设计的双波段双极化的 T/R 组件性能良好,在同一空间内实现的双波段信号的接收和发射,而且互不干扰,同时发射功率和接收通道的带外抑制都较高。同时该 T/R 组