

3 mm 波相参脉冲放大链

唐小宏* 樊勇 郑浩元 张永鸿 吴正德

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

【摘要】 根据 3 mm 波段相参脉冲雷达对发射机的要求,拟定了基波注入锁定 3 mm 波谐波振荡器、3 mm 波连续波雪崩振荡器和两级脉冲雪崩振荡器级联注入锁定的放大链路方案,提出并实施了“脉间异频防泄漏技术”,抑制了漏信号对系统工作的有害影响,实现了当输入电平为 2 mW 的 6 mm 波信号时,3 mm 波输出脉冲峰值功率大于 5 W,脉宽约 30 ns。

关键词 毫米波; 相参脉冲放大链; 注入锁定; 雪崩; 泄漏
中图分类号 TN752.7

1980 年前后,美国休斯公司报道了频率捷变 94 GHz 雷达前端的有关研究工作^[1]。这种相参脉冲前端提供了瓦级峰值功率的脉冲,能以固定频率模式和频率捷变模式两种方式工作。美国休斯公司飞机导弹系统分部 Canoga Park Calif. 完成了采用 IMPATT 脉冲发射机的 94 GHz 导弹寻的飞行平台实验,取得了令人鼓舞的实验结果^[2]。80 年代中期,西德 AEG 公司的研究人员在 94 GHz 实现了 3 级级联注入锁定脉冲 IMPATT 放大链^[3],并在相参雷达系统中得到成功地应用。

国内对 3 mm 波段雷达关键技术的研制起步于 90 年代初期,完成了 FMCW 体制和相参脉冲体制的雷达研究工作。本文介绍了我们承担的 3 mm 波相参脉冲放大链的研究工作。

1 相参脉冲放大链方案设计

图 1 为 3 mm 波相参脉冲放大链框图。当在输入端注入 6 mm 频段小功率信号时,输出端将提供要求的 3 mm 波脉冲。组件的第一级采用了基波注入锁定的 3 mm 波连续波 Gunn 谐波振荡器,这样就使高质量的毫米波频综信号在 6 mm 频段产生,在保证频谱质量的前提下,降低了系统成本,提高系统可靠性;其次是有效地利用 Gunn 器件谐波工作模式,同时完成二次倍频和功率放大的功能,简化了系统配置。组件中的第二级是 3 mm 连续波雪崩注入锁定放大器,第三级是用连续波注锁的末前级脉冲振荡器,第四级为末级脉冲振荡器,提供系统最终要求的脉冲输出功率。

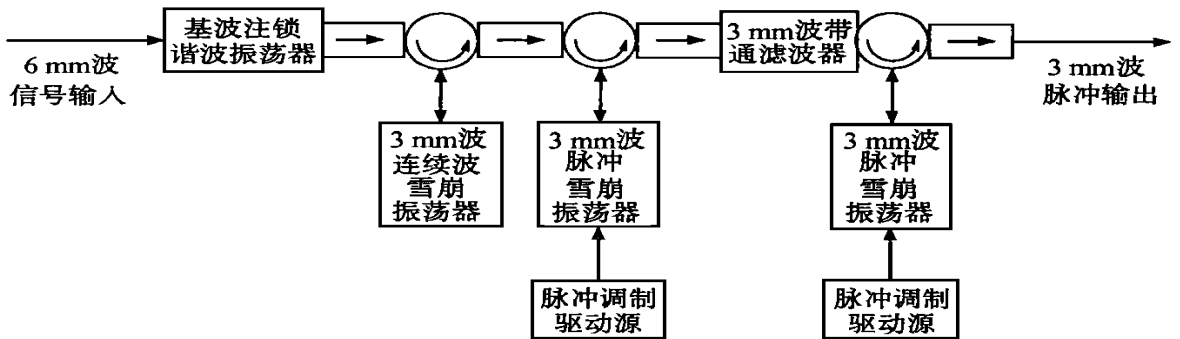


图 1 3 mm 波相参脉冲放大链框图

我们在研究中发现,尽管组件最后两级是级联注锁脉冲振荡器,但在两个脉冲之间前级的连续波泄漏到输出端的平均功率可能达到数十微瓦量级,这样大的连续波信号通过收发隔离环形器使接收机饱和,并淹没空间目标的回波信号,致使雷达无法工作。为此,我们提出了“脉间异频防泄漏技术”方案,其原理说明如图 2 所示。

首先通过某种方式将 6 mm 波信号变成与 3 mm 波脉冲周期相同的脉冲信号, 脉冲宽度达数百纳秒量级, 脉内是纯洁 6 mm 波信号。在脉间没有 6 mm 波信号时, 基波注入锁定 3 mm 波谐波振荡器因没有注入信号而处于自由振荡状态, 在电路设计和调试中保证自由振荡频率跳到发射组件所要求的工作带宽之外, 同时这个频率还能将后一级连续波雪崩振荡器锁定, 所以在没有 6 mm 波输入信号时, 即在相邻两个脉冲的间隙内, 漏泄的连续波被移到带外。我们在链路中再插入一只性能良好的 3 mm 波带通滤波器, 进一步抑制泄漏信号。即使还有很微弱的泄漏信号, 由于它已远离工作频带, 在中频电路中将受到进一步抑制, 从而根本上克服了脉间连续波泄漏问题, 保证接收机正常工作。

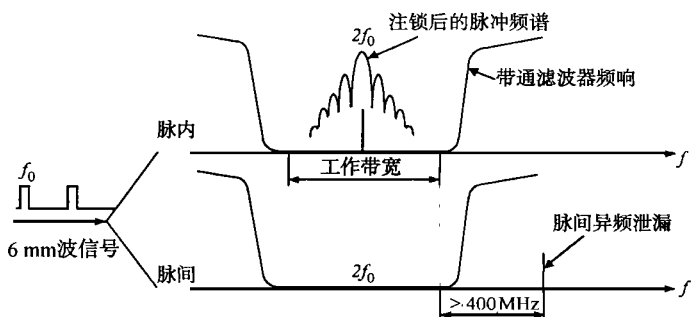


图 2 “脉间异频防泄漏技术”原理说明图

我们在链路中再插入一只性能良好的 3 mm 波带通滤波器, 进一步抑制泄漏信号。即使还有很微弱的泄漏信号, 由于它已远离工作频带, 在中频电路中将受到进一步抑制, 从而根本上克服了脉间连续波泄漏问题, 保证接收机正常工作。

2 级联部件的设计考虑

2.1 基波注入锁定 3 mm 谐波振荡器设计

第一级基波注入锁定 3 mm 波谐波振荡器是放大链的关键部件, 它的性能好坏直接影响到放大链的频率捷变、相参性和“脉间异频防泄漏技术”的实现。因此要求该振荡器在较小的 6 mm 波注入信号下, 具有较宽的注入锁定带宽, 且自由振荡频率应在放大链的工作带宽之外 400 MHz 以上, 处在 3 mm 波带通滤波器的高衰减阻带内。同时又要有足够的输出功率去注入锁定后一级连续波雪崩振荡器(包含其工作带外的自由振荡频率)。

根据基波注入锁定谐波振荡器的理论结果^[4], 为了能得到较宽的锁定带宽, 我们设法降低基波输出端口的外部 Q 值, 但又不能使基波与外部电路耦合太紧, 让基波输出功率过大而破坏谐波振荡工作模式。为此, 我们设计了如图 3 所示的电路结构。为了使振荡器既能输出基波又能输出第二次谐波, 安放器件的矩形波导主腔必须能够同时允许基波和谐波存在。这里设计的主腔截止频率为 37.5 GHz, 保证了振荡器能在 6 mm 和 3 mm 波段工作。振荡器右边接 3 mm 波导法兰, 左边接 6 mm 波导法兰, 在主腔和 6 mm 波导法兰之间嵌入一耦合膜片, 以便控制基波回路与外部负载的耦合强度。另外, 为了防止谐波振荡器的基波输出功率影响注入信号源, 实际应用中, 必须在 6 mm 输出端口反向接一个 6 mm 隔离器。

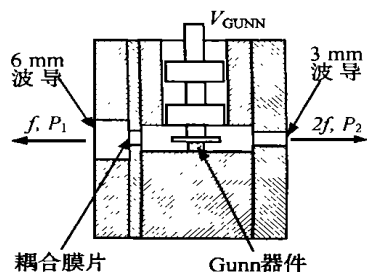


图 3 基波注入锁定用的 3 mm 波谐波振荡器电路结构

在理论分析和实验研究的指导下, 我们研制出基波注入锁定的 3 mm 波第二次谐波 Gunn 振荡器。图 4 给出了在注入 2 mW 的 6 mm 波信号功率时, 3 mm 波谐波端口的功率-频率响应曲线。从图 4 可以看出, 3 mm 波输出端口的谐波输出功率大于 5 mW, 振荡器注入锁定带宽达到 1 500 MHz, 同时获得了 3 dB 以上的倍频增益。

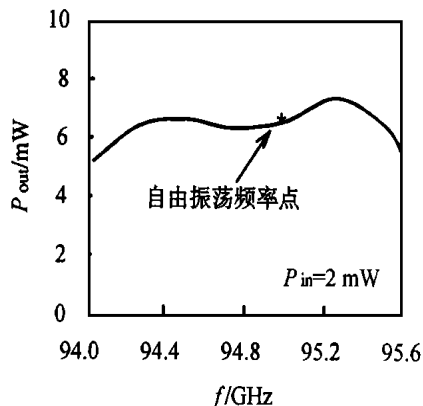


图 4 基波注入锁定 3 mm 波谐波振荡器功率-频率响应特性

2.2 3 mm 波连续波雪崩注入锁定放大器设计

基波注锁的 3 mm 波谐波振荡器输出的几毫瓦量级的功率放大到百毫瓦量级, 以推动末前级脉冲振荡器, 要求在工作带宽

内和前级自由振荡频率点上均能被注入锁定, 并且工作带宽内的相位噪声不能因注入锁定放大有明显恶化。

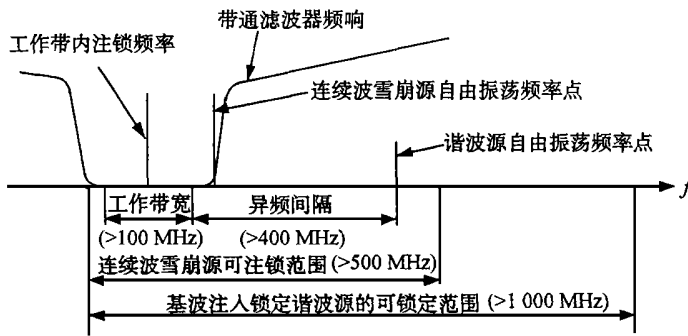


图 5 放大链前两级注锁情况的频率分配关系示意图

图 5 给出了频率配置关系示意图。

我们首先对 3 mm 波连续波雪崩振荡器进行了研究^[5], 这是解决大功率注入锁定源的关键。由

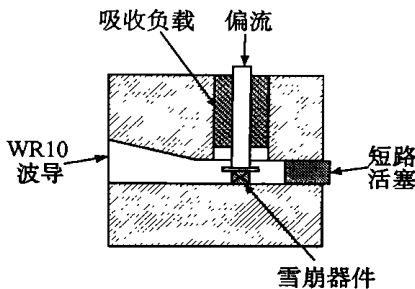


图 6 3 mm 波雪崩振荡器结构示意图

于毫米波雪崩振荡器大都使用帽型电路结构, 为此, 我们在电路设计中采用了减高波导内的帽结构振荡器电路, 如图 6 所示。雪崩器件安放在矩形波导底面, 其上由一末端带圆盘的圆柱细棒顶紧, 偏流通过细棒向雪崩器件馈电。圆盘和腔体之间形成一径向谐振腔, 振荡器的频率主要由圆盘大小决定, 减高波导的目的在于很好地实现有源器件的低阻抗与矩形波导的高阻抗之间的匹配。波导后面的短路活塞使能量全部向输出口传输, 调节短路活塞使输出功率最大。改变同轴腔吸收负载的上下位置, 可使振荡器工作在最佳状态。图 7 给出了 3 mm 波连续波

雪崩振荡器的注入锁定频响特性曲线。 L/dB

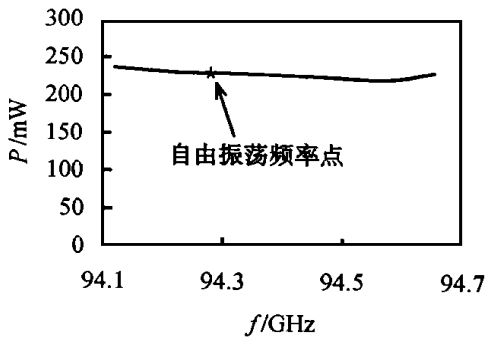


图 7 3 mm 波雪崩注入锁定放大器的频响特性曲线

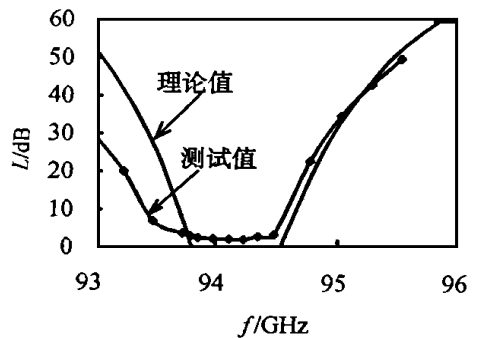


图 8 3 mm 波带通滤波器的理论设计和实验测试结果曲线

2.3 3 mm 波脉冲振荡器设计

为了实现良好的相参脉冲注入锁定, 我们采用了两级脉冲注锁放大, 末前级为 2 W 量级的脉冲振荡器, 末级为大于 5 W 量级的脉冲振荡器。

由于毫米波雪崩器件的有源阻抗很低, 在电路设计中我们仍采用同 3 mm 波连续波雪崩振荡器相同的减高波导内帽结构振荡电路(如图 6 所示)。改变同轴腔吸收负载的上下位置, 不仅可调节输出功率, 又可在一定程度上控制脉冲波形。

值得注意的是, 末前级输出脉冲频谱的好坏将直接影响到整个发射组件的频谱质量和脉冲波

形。在调试中,控制脉冲内部的寄生调频(Chip)很重要,只有有效地压低脉冲内的寄生调频,才有可能用单频连续波对脉冲进行良好的注入锁定。末级脉冲振荡器主要提供最终的脉冲发射功率。一般要求末前级脉冲的脉宽略大于末级的脉冲宽度,才能保证整个输出脉冲的相参性。

2.4 3 mm 波带通滤波器设计

3 mm 波带通滤波器是实现“脉间异频防泄漏技术”的又一关键部件,对它的要求是通带插损小,阻带隔离大,通带到阻带的变化陡峭。我们采用矩形波导内 E 面金属窗电路结构,利用计算机辅助设计,研制出了 3 mm 波带通滤波器。图 8 给出了矩形波导 E 面金属窗 3 mm 波带通滤波器的理论设计和实验测试结果曲线。

2.5 脉冲驱动电源要求

在脉冲雪崩振荡器的制作中,脉冲调制驱动源是十分重要的因素,如果驱动源不具有足够的电流驱动能力,则不可能使器件进入正常的雪崩工作区。一般情况下,如果器件正常工作需要的脉冲峰值电流为 10 A,那么潜在的驱动能力至少应高达 15 A 以上。在调试中,控制脉冲内部寄生调频(Chip)很重要,常常要经过对毫米波电路结构的反复调整,同时选择适当的驱动电压电平,才能达到基本要求。在 3 mm 相参脉冲发射组件的调试中,特别应注意前后两级驱动源的波形和电平控制。另外,在采用同一触发信号触发时,应方便调节两级驱动源之间的相互延迟,以便最终实现 3 mm 波脉冲雪崩振荡器良好的级联注入锁定。

3 相参脉冲放大链发射组件的测试

图 9 是 3 mm 波段雷达相参收发前端子系统的设计框图。来自 L 波段的同一个频率综合器的信号通过收、发支路的上变频器分别驱动发射组件和接收机本振,实现频率相参。来自终端的时间信号控制发射脉冲,保证信号处理的时间关系。在发射支路前端插入一调制器将 L 波段的连续波频综信号变成周期与 3 mm 波脉冲相同的脉冲,再经过上变频器使 6 mm 波锁相源的连续波信号变换成相同周期的脉冲同步信号,满足异频防泄露的技术要求。

3.1 放大链发射组件的输出特性

我们测试了放大链的工作频率、脉冲输出功率,以及在注入 6 mm 频段捷变频信号时,观测了放大链输出信号的质量。另外,在发射通道上用 1 GHz 调制器控制 6 mm 频段捷变频信号的情况下,观察了放大链输出端口的连续波泄漏程度。其测试结果如下:

1) 当输入 2 mW 的 6 mm 频段信号时,在 3 mm 频段放大链的输出脉冲峰值功率大于 5 W,工作带宽 100 MHz,脉宽约 30 ns。脉冲检波波形和频谱均良好,如图 10 所示。

2) 在 1 GHz 调制器工作时,放大链工作正常,且在频谱仪上观察不到任何泄漏的连续波注入信号,证实了该组件采用的“脉间异频防泄漏技术”是有效的。

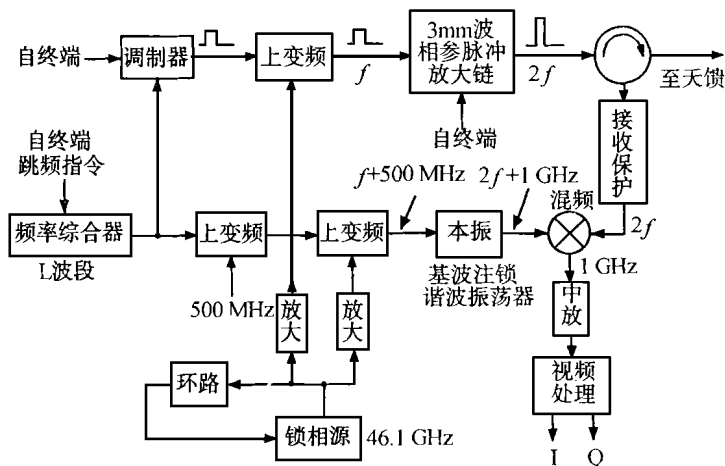


图 9 3 mm 波相参脉冲收发前端子系统设计框图

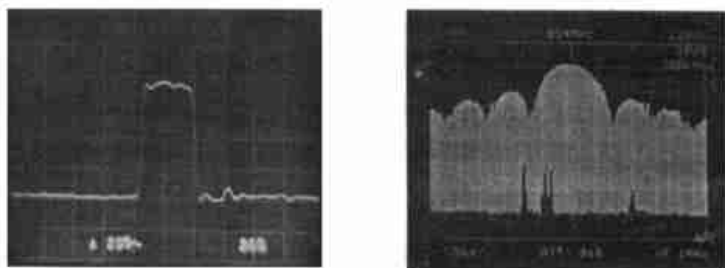


图 10 3 mm 波相参脉冲放大链发射组件输出信号的典型频谱和波形

3.2 发射和接收组件的频率同步特性

在收发前端的方案设计中, 6 mm 频段捷变频组件两个端口输出信号的频差用 1 GHz 为 0.5 GHz, 因为接收机本振仍采用基波注入锁定的 3 mm 波谐波振荡器, 所以, 当系统正常工作时, 在接收机中频输出口发射脉冲回波与本振的差频应恒为 1 GHz。为此, 我们用负载取代 3 mm 波天线, 直接观察中频输出口的信号。

测试结果表明, 在 100 MHz 捷变频带宽内, 中频信号频率始终为 1 GHz, 信号质量好, 收发组件频率同步很好。

3.3 放大链相参特性的观测

相参脉冲放大链发射组件的相参特性是极为重要的电气指标。在国内目前还尚未建立完善的 3 mm 波脉冲信号相参特性测试系统的情况下, 依据相参雷达实际的工作情况, 我们模拟系统工作, 建立了观测系统, 从视频 IQ 端直接观测得到的脉冲波形。在实验中, 观测到当相参放大链发射组件工作时, 其 IQ 端输出脉冲波形质量良好, 工作稳定。根据过去研制微波相参雷达的实际经验, 认为该放大链发射组件的相参特性已在一定程度上较好地达到系统设计所希望的技术要求。

4 结束语

我们研制的 3 mm 波相参脉冲放大链发射组件成功地应用在 3 mm 波段雷达原型样机中, 进行了固定目标观测、动目标检测、变极化和捷变频试验等一系列系统实验, 达到了预期目的, 为开展 3 mm 波段雷达研究和应用奠定了技术基础, 具有广泛的应用前景。

感谢电子部十所甘体国、马朝华等专家对本文工作的大力协作和支持。

参 考 文 献

- 1 Cadwalader J, English D. Millimeter front end provides frequency agility. *Microwave Systems News*, 1980; 41 ~ 51
- 2 Francisco J Bernues Robert S Ying, Morrrie Kaswen. Solid state oscillators key to millimeter radar. *Microwave Systems News* 1979; 79 ~ 86
- 3 Barth H. A three stage injection-locked 94 GHz IMPATT oscillator chain. *Military Microwave Symp*, 1986; 534 ~ 539
- 4 唐小宏, 吴正德, 樊勇. 基波注入锁定 3mm 谐波振荡器研究. *电子学报*, 1996, 24(3): 97 ~ 99
- 5 唐小宏, 吴正德, 樊勇. 3mm IMPATT 注入锁定放大器的实验研究. 合肥: 全国微波会议论文集, 1993; 1 094 ~ 1 097

3mm Wave Coherent Pulsed Amplifier Chain

Tang Xiaohong Fan Yong Zheng Haoyuan Zhang Yonghong Wu Zhengde

(Inst. of Applied Physics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract According to the design of 3 mm-wave radar, an amplifier-chain scheme of the coherent pulsed transmitter is proposed. The chain consists of a fundamental injection-locked harmonic Gunn oscillator, a CW IMPATT oscillator and two pulsed IMPATT oscillators in cascade. In order to overcome the effect of the leak signal in the system, a new technique of suppressing the leak in the intervals of pulse by altering the frequency is created and realized in success. The developed transmitter provides the output of 5 W peak power and 30 ns pulse-width in 3 mm-wave with the input of 2 mW signal in 6 mm-wave.

Key words millimeter wave; coherent pulsed amplifier chain; injection-locked; IMPATT; leak