



·高功率微波技术·

固态有源相控阵快前沿脉冲发射及空间合成*

王乃志^{1,2}, 吴鸿超^{1,2}, 王侃^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 南京 210039;
2. 天线与微波技术国防科技重点实验室, 南京 210039)

摘要: 快前沿射频脉冲发射是固态有源相控阵可实现的优势功能。分析了 X 波段固态有源相控阵实现快前沿射频脉冲发射的必要条件, 包括激励传输、功率放大、定时同步和孔径渡越等影响因素及设计要点。相应的分析结论应用于某型 X 波段固态有源相控阵的样机研制, 最终实现了数千个固态有源通道的快前沿射频脉冲的高效空间合成, 合成射频脉冲前沿低于 5 ns, 验证了分析与设计的有效性。

关键词: X 波段相控阵; 固态有源; 快前沿脉冲; 空间功率合成

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220338

Fast leading-edge pulse emission and spatial combination of solid-state active phased array

Wang Naizhi^{1,2}, Wu Hongchao^{1,2}, Wang Kan^{1,2}

(1. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China;
2. National Defense Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Fast leading-edge RF pulse emission is an advantageous function of solid-state active phased arrays. In this paper, the conditions of realizing fast leading-edge RF pulse emission are analyzed, including influences and design points of RF excitation transmission, power amplification, timing synchronization and aperture fill time. The conclusions are applied to a prototype design of an X-band solid-state active phased array, followed by validation test. RF pulses emitted by thousands of solid-state active channels are spatially combined into one, with the leading-edge shorter than 5 ns, which validates the analysis.

Key words: X-band phased array, solid-state active, fast leading-edge pulse, pulse spatial combination

随着第三代半导体技术的发展, 固态微波大功率器件的输出峰值功率大幅提高, 单功率管可达数百 W 至数千 W^[1-3]。这为固态有源相控阵的功能扩展提供了必要条件, 使相应的雷达系统可实现探测、干扰、攻击等多功能一体化, 进一步形成新质作战能力。在雷达探测方面, 采用上升沿 ns 级、脉宽数 ns 至数十 ns 的快前沿窄脉冲代替传统发射波形, 可降低信号被截获概率, 提高雷达抗干扰能力^[4-6]。窄脉宽的脉压得益不足会使雷达威力降低, 而应用大功率固态有源器件的相控阵可通过高峰值功率弥补这种不足, 但还需使其成千上万个固态有源通道能够发射并在空间有效合成快前沿射频脉冲。在干扰对抗和微波攻击方面, 敌方电子设备的射频接收前端是打击目标之一, 通常有射频限幅器保护。限幅器达到限幅稳态时呈现全反射态, 需充分利用限幅器数 ns 至数十 ns 的尖峰泄露, 实现大功率微波穿透以损伤限幅器及低噪声放大器电路器件^[7-12]。可见, 干扰对抗和微波攻击同样需要固态有源相控阵的各固态有源通道能够发射并在空间有效合成快前沿射频脉冲。本文分析了 X 波段固态有源相控阵实现快前沿射频脉冲发射的必要条件, 包括激励传输、功率放大、定时同步和孔径渡越等影响因素及设计要点, 并辅以试验验证。

1 固态有源发射链路

X 波段固态有源相控阵多以结构和电讯功能独立的模块化子阵为基本单元进行积木化扩展形成。考虑固态

* 收稿日期: 2022-10-13; 修订日期: 2023-02-19
联系方式: 王乃志, nzwang@163.com。

模拟有源发射的情况,如图1所示,频率源产生快前沿射频脉冲激励信号,先由前级放大组件进行功率放大,后经发射网络分配传输至各模块化子阵。在模块化子阵内,射频脉冲激励信号经子阵延时放大组件再次放大,然后分配传输至模块化子阵内的各T/R组件,激励其各有源发射通道产生大功率快前沿射频脉冲信号,最终经天线单元向外辐射。

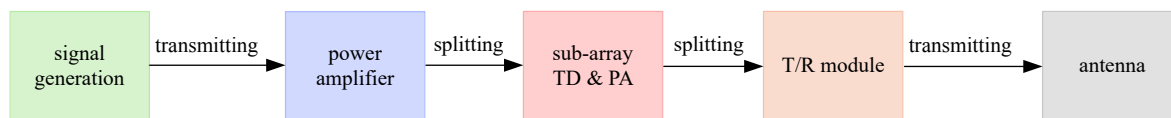


Fig. 1 Flow chart of RF power transmitting

图1 发射链路框图

2 快前沿射频脉冲发射

2.1 快前沿脉冲传输

相控阵各有源通道的射频激励信号来自同一路频率源,其时域抖动具有一致性,射频激励信号时域抖动的影响可以忽略。X波段射频激励信号分配网络终端的相位离散通常控制在 $\pm 10^\circ$,变换到时域,以8 GHz为例,分配网络的时延一致性可控制在 ± 0.01 ns,射频激励信号分配网络时域一致性的影响也可以忽略。

大型X波段固态有源相控阵中,系统级较高频段的射频网络通常采用波导网络,这是因为长的射频电缆的幅相特性对温度较为敏感^[3],而金属波导幅相特性较为稳定。但波导网络为非线性传输系统,存在色散,会对射频脉冲上升沿产生影响。典型的波导色散对射频脉冲上升沿的影响如图2所示,其中脉冲宽度为20 ns,脉冲上升沿(10%~90%幅度)3 ns,射频载频为8 GHz,波导型号为BJ100,其内腔尺寸为22.86 mm×10.16 mm,波导长度为14 m,通过计算得到波导输出脉冲包络的上升沿时间(10%~90%幅度)为5.42 ns。

不同输入脉冲上升沿时间、不同口径的波导输出脉冲上升沿的时间如表1所示,其中脉冲宽度均为20 ns。对于长度14 m以下的BJ100的波导,输入信号的上升沿时间 ≥ 5 ns时,基本可以无损传输脉冲前沿。对于长度14 m以下的BJ84的波导,输入信号上升沿时间 ≥ 3 ns时,基本可以无损传输脉冲前沿。因此,X波段快前沿射频激励信号的分配传输网络可考虑选择BJ84波导。

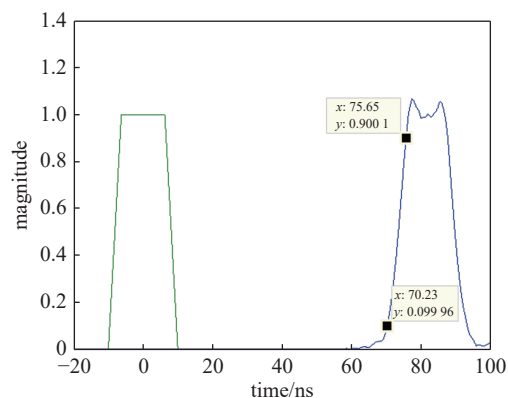


Fig. 2 Effect of waveguide dispersion on pulse leading-edge

图2 波导色散对脉冲上升沿的影响

表1 波导色散对脉冲前沿上升时间的影响

Table 1 Effect of waveguide dispersion on pulse leading-edge

leading edge of input pulse/ns	leading edge of output pulse/ns			
	BJ100, 7 m	BJ100, 14 m	BJ84, 7 m	BJ84, 14 m
1	4.80	7.60	2.07	3.32
2	3.85	6.14	2.44	2.81
3	4.14	5.42	3.14	3.61
5	5.53	6.30	4.92	5.12
7	7.12	7.71	6.85	6.90
10	9.84	10.07	9.90	9.79

2.2 快前沿脉冲放大

受分布式寄生参数影响,作为脉冲调制器负载的固态微波功率器件及相应外围电路为非纯阻态,发射脉冲调制的上升沿难以做到ns级,而对于大功率固态功率管的大电流调制则可能有数十ns的上升沿时间。

为了避免调制脉冲上升沿对射频脉冲上升沿的影响,需要提前打开功放调制器,在时间上让出脉冲调制上升沿时间及调制响应延时,然后再输入射频脉冲激励。因此,系统采用图3所示的发射定时时序嵌套关系,T/R组件的收发切换和射频激励信号的前级放大采用TR1定时,TR组件内有源通道的发射脉冲调制采用TR2定时。射频

激励信号脉宽最小, TR2 信号次之, 最长是 TR1 信号。射频激励脉宽为 t_2 ; TR2 前沿领先射频激励前沿时间为 t_1 , 其长度受调制脉冲上升沿和调制响应延时影响; TR2 后沿滞后射频激励后沿 t_3 ; 实际产生的发射调制脉冲波形如图 3 所示。

除上述定时时序嵌套关系的选定, 还需考虑各级功率放大器类型。A 类放大器通过偏置电压设置一直处于工作状态, 不会因无射频激励信号而被关闭, 所以没有“开启”时间, 其可以非常精确的以较高效率再现射频激励信号波形。整个发射链路中的有源放大器件, 包括激励分配网络中的多级前级功放和 T/R 组件有源发射中的多级功放, 均采用 A 类放大器, 可有效避免有源放大器件对脉冲上升沿的恶化。

2.3 定时时域离散

TR2 作用于固态有源相控阵的全部有源发射通道, 而有源发射通道内的功率放大均采用 A 类放大器, A 类功放在有无射频激励时功耗相当, 发射调制脉冲内无射频激励的部分将全部转化为热耗, 影响发射效率。因此, TR2 不能随意展宽, 无射频激励的发射调制脉冲部分应尽可能短, 这取决于大功率固态功率管大电流脉冲调制器的前后沿时间和 TR2 传输后的时域离散。前者不在本文讨论, 本节仅讨论 TR2 时域离散的影响。

固态有源相控阵的系统定时信号经光传网络分配传输至各模块化子阵, 模块化子阵内的波控组件将光定时信号恢复为电定时信号, 然后同步发送给各 T/R 组件。受 T/R 组件内控制电路负载差异等因素的影响, 定时信号在 T/R 组件内的传输过程中会产生十 ns 级(百通道样本统计 RMS 值)的时域离散。

各有源通道的 TR2 时域离散最终转变为发射调制脉冲的时域离散。计算 256 路脉宽 30 ns、前后沿各 20 ns (0%~100% 幅度)、时域离散 10 ns(RMS)的发射调制脉冲的合成波形(TR2 脉宽为 50 ns), 模拟空间合成后的等效发射调制脉冲波形。计算结果如图 4 所示, 256 路脉宽 30 ns 的无时域离散脉冲空间合成后平顶部分仍为 30 ns, 合成得益 256; 256 路脉宽 30 ns 的离散脉冲空间合成后已无脉冲平顶部分, 且合成得益小于 256(约 246)。射频激励脉冲与此等效发射调制脉冲相乘即可得到空间合成的射频脉冲波形, 这意味着 TR2 的时域离散将影响脉冲功率空间合成效率及合成脉冲前沿。

为避免上述定时时域离散对快前沿射频脉冲的影响, 需通过展宽图 3 中所示 TR2 的 t_1 与 t_3 部分。如图 4 中所示, 将 TR2 前后各展宽 20 ns(TR2 展宽至 90 ns), 即 256 路脉宽 70 ns、前后沿各 20 ns(0%~100% 幅度)、时域离散 10 ns(RMS)的脉冲空间合成后平顶部分约为 30 ns, 且合成得益与无时间离散情况相同, 但这将恶化发射效率。若固态有源相控阵发射 30ns 的快前沿射频脉冲, 发射脉冲调制前后沿均为 20 ns, A 类放大器理论效率为 50%, 上述定时时域离散将导致末级功放发射效率比无时域离散情况降低约 13%。

2.4 孔径渡越时间

因相控阵的各天线单元与远场目标之间的距离不同, 相控阵波束扫描时存在孔径渡越问题。孔径渡越时间与阵列口径和波束扫描角度相关, 其会对远场合成的射频脉冲上升沿带来恶化^[14-15]。以 8 GHz 为例, 方位向天线单元数量 224 个、间距 30 mm, 发射脉宽 30 ns、前后沿 5 ns 的射频脉冲, 方位波束扫描 30°时, 受孔径渡越时间的影响, 全部有源通道的发射脉冲到达远场目标的时刻会均匀离散在 11.15 ns 内, 导致远场合成的射频脉冲上升沿由 5 ns 展宽为 10 ns, 有效脉冲宽度同步减小, 合成波形如图 5 中所示。

孔径渡越时间可通过延时组件在有源子阵级以中心频点波长为最小刻度来进行补偿。例如, 采用 7 位延时组件, 对应的 8 GHz 的延时时间刻度约为 0.125 ns, 最大延时时间约为 15.875 ns, 最小补偿刻度远小于脉冲上升沿时间, 最大延时量大于最大扫描角状态的孔径渡越时间, 可实现不同有源子阵发射脉冲的较高精度对齐。然后, 相控阵在方位向采用 8 通道的有源子阵规模, 子阵内的孔径渡越时间即控制在 0.4 ns 以内, 对脉冲合成的影响可忽略。经在有源子阵级补偿孔径渡越时间, 224 通道远场合成的射频脉冲波形如图 5 中所示, 上升沿仅恶化 0.2 ns。

3 固态有源相控阵样机验证

某型 X 波段固态有源相控阵样机基于大功率固态有源器件研制, 设计过程中充分借鉴了前述分析成果, 最终成功使数千个固态有源通道发射并在空间高效合成了快前沿射频脉冲。

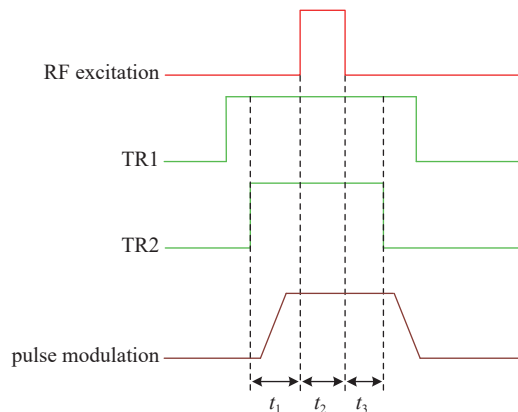


Fig. 3 Timing sequence for pulse modulation

图 3 发射定时信号嵌套关系

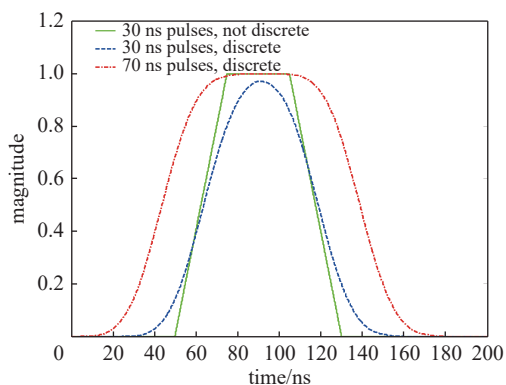


Fig. 4 Effect of timing signal discretization on spatial pulse combination

图 4 TR2 时域离散对合成脉冲波形的影响

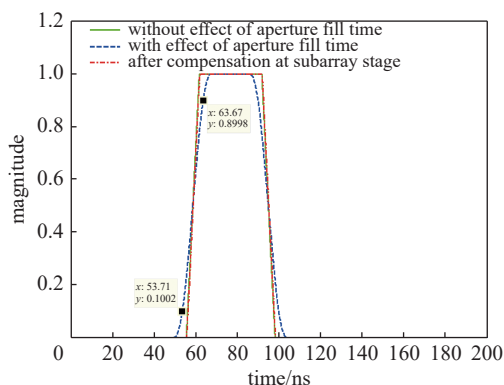


Fig. 5 Effect of aperture fill time on spatial pulse combination

图 5 孔径渡越时间对合成脉冲波形的影响

图 6 所示为样机试验场景以及频率 8 GHz、脉宽 100 ns 快前沿射频频脉冲发射测试结果, 实测空间合成脉冲宽度为 100.12 ns、脉冲前沿 4.49 ns、脉冲后沿 4.09 ns, 合成得益与理论预期相符, 末级功放发射效率达 30%。

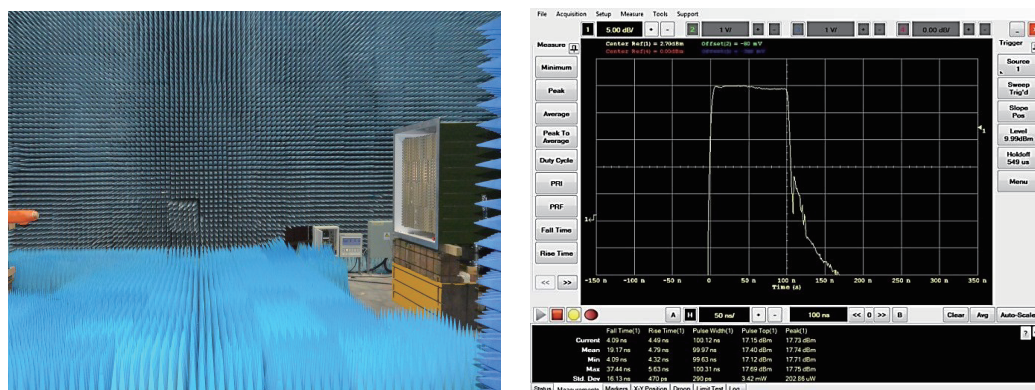


Fig. 6 Prototype and emission pulse with leading-edge shorter than 5 ns

图 6 样机试验场景及快前沿脉冲合成结果

4 结 论

经分析, 对于本文所示发射链路架构的固态有源相控阵, 其发射并在空间合成的射频脉冲上升沿时间受射频激励传输、固态功放类型、调制定时同步、孔径渡越时间等因素影响。在某型 X 波段固态有源相控阵样机设计过程中充分考虑了上述因素, 采取使用 BJ84 波导射频激励传输网络、A 类固态功放、多位延时组件以及优化控制发射脉冲调制定时时域离散范围等措施, 实现了数千个固态有源通道的快前沿射频频脉冲的高效空间合成, 合成脉冲前沿低于 5 ns。

参考文献:

- [1] 蒋廷勇. 固态器件合成高功率微波技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016: 1-2. (Jiang Tingyong. High power microwave power combination with solid-state device[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016: 1-2)
- [2] 赵鸿燕. 国外高功率微波武器发展研究[J]. 航空兵器, 2018(5): 21-28. (Zhao Hongyan. Research on overseas high power microwave weapon development[J]. Aero Weaponry, 2018(5): 21-28)
- [3] Wu Y F, Moore M, Saxler A, et al. 40-W/mm double field-plated GaN HEMTs[C]//Proceedings of the 64th Device Research Conference. 2006: 151-152.
- [4] 侯小林, 彦彦, 高健健, 等. 雷达低截获概率信号及验证方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 184-190. (Hou Xiaolin, Yang Yan, Gao Jianjian, et al. Methods for testing the low probability of interception performance of radar signals[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(4): 184-190)
- [5] Stimson G W. Introduction to airborne radar[M]. Mendham: SciTech Publishing, 1998.
- [6] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. (Wu Shunjun, Mei Xiaochun. Radar signal processing and data processing technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008)
- [7] 李吉浩. 高功率脉冲对PIN限幅器的损伤效应研究[J]. 微波学报, 2012, 28(s3): 315-318. (Li Jihao. Research on HPM pulse damage effect of PIN limiter[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(s3): 315-318)
- [8] 陈自东, 秦风, 赵景涛, 等. 高功率微波作用下限幅器尖峰泄漏特性[J]. 强激光与粒子束, 2020, 31: 103014. (Chen Zidong, Qin Feng, Zhao Jingtao, et al.

- Spike leakage characteristic of limiter irradiated by high power microwave[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 31: 103014)
- [9] 陈曦, 杜正伟, 龚克. 脉冲宽度对PIN限幅器微波脉冲热效应的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(7): 1602-1606. (Chen Xi, Du Zhengwei, Gong Ke. Effect of pulse width on thermal effect of microwave pulse on PIN limiter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1602-1606)
- [10] 李勇, 宣春, 谢海燕, 等. 电磁脉冲作用下PIN二极管的响应[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8): 2061-2066. (Li Yong, Xuan Chun, Xie Haiyan, et al. Response of PIN diode to electromagnetic pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 2061-2066)
- [11] 王冬冬, 邓峰, 郑生全, 等. PIN二极管限幅器的电磁脉冲损伤特性试验[J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(2): 65-69. (Wang Dongdong, Deng Feng, Zheng Shengquan, et al. Experimental investigation on the EMP damage characteristics of PIN diode limiters[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(2): 65-69)
- [12] 周敏, 郭庆功, 黄卡玛. PIN限幅二极管结温对尖峰泄漏的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 277-280. (Zhou Min, Guo Qinggong, Huang Kama. Effect on peak leakage caused by junction temperature rise in PIN diode limiter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 277-280)
- [13] 戈弋, 黄华, 袁欢. 温度和机械弯曲引起的同轴电缆相位变化特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(4): 621-626. (Ge Yi, Huang Hua, Yuan Huan. Phase characteristics of coaxial cable caused by temperature and mechanical bending[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(4): 621-626)
- [14] 张晨, 赖清华. 相控阵雷达受孔径渡越时间影响的研究[J]. *微波学报*, 2017, 33(4): 67-69,84. (Zhang Chen, Lai Qinghua. Research of aperture fill time effect on phased array radar[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(4): 67-69,84)
- [15] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (Zhang Guangyi. Principles of phased array radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009)