



·高功率微波技术·

时分复用射频前端高功率微波波形响应*

张泽海, 周扬, 张洋, 阳福香, 葛行军, 贺军涛

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 高功率微波技术研究所, 长沙 410073)

摘要: 为研究系统级射频设备高功率微波前门效应, 采用注入法对某 4G 基站的滤波器、环形器、低噪声功放构成的射频前端进行实验研究。结果表明, 高功率微波脉冲上升沿和下降沿被射频前端滤波器强烈反射, 脉冲平顶段反射很小。反射波形在上升沿及下降沿呈尖峰、在脉冲中部呈平底, 显示高功率微波陡峭的上升沿和下降沿包含的丰富的滤波器带外频率成分被反射, 导致通过滤波器的脉冲头尾被削弱。经滤波器后, 高功率微波脉冲可由环形器进入上行通道低噪放, 进而被反射, 环形器进入下行通道功率放大器, 被再次反射, 再环形器从注入口输出。实验中监测到了经两次反射环形器的高功率微波脉冲。说明在高功率脉冲条件下, 原本由环形器隔离的下行通道功率放大器同样会承受上行通道进入的高功率微波脉冲损伤的风险。

关键词: 射频前端; 时分复用; 高功率微波; 波形响应; 环形器

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230106

Waveform response to high power microwave pulse in time-division multiplexing RF front end

Zhang Zehai, Zhou Yang, Zhang Yang, Yang Fuxiang, Ge Xingjun, He Juntao

(Institute of High-Power Microwave, College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To study the high-power microwave front door effect of system-level RF equipment, the injection method was used to conduct experimental research on the RF front end composed of filter, circulator, low-noise amplifier and power amplifier of a 4G base station. The results show that the rising and falling edges of the high-power microwave pulse are strongly reflected by the RF front-end filter, and the reflection of the pulse flat top section is small. The reflected waveform spikes on the rising and falling edges, and the flattened part in the middle of the pulse, showing that the rich out-of-band frequency components of the filter contained in the steep rising and falling edges of the high-power microwaves are reflected, resulting in weakened pulses passing through the filter. After passing through the filter, the high-power microwave pulse can enter the upstream channel low noise amplifier from the circulator, and then be reflected, circulate into the downlink channel power amplifier, be reflected again, and then loop through the injection port output. High-power microwave pulses traveling through two reflection loops were detected in the experiment. This shows that under high-power pulse conditions, the downlink channel power amplifier originally isolated by the circulator is also at risk of damage from the high-power microwave pulse entering the upstream channel. This study has certain reference significance for the study of system-level high-power microwave front door effect.

Key words: radio frequency front end, time-division multiplexing, high power microwave, waveform response, circulator

高功率微波^[1-2]对电子设备的毁伤效应分为前门效应和后门效应^[3], 后门效应耦合通道与效应物屏蔽特性、孔隙特性等有关^[4], 而前门效应耦合通道与设备射频通道的射频特性基本一致^[5-6]。因此, 在前门效应中, 毁伤效果除了与效应物敏感元器件损伤阈值有关外, 还与射频通道相关。在高功率微波效应研究中, 对纯接收设备如全球定

* 收稿日期: 2023-04-26; 修订日期: 2023-07-21

基金项目: 湖南省科技创新计划项目 (2021RC2065); 国防科技大学学校科研计划项目 (ZK22-42)

联系方式: 张泽海, zhangzehai@nudt.edu.cn.

位系统(GPS)接收天线或收发设备中的接收链路效应研究较多^[7-11],且一般通过隔离出射频前端低噪声放大器进行分立器件的效应阈值和规律的研究^[12],而射频通道对高功率微波效应的影响仅作为衰减项考虑。但在时分复用射频前端中,为了保证工作频率不被其他频率干扰,常采用滤波器进行带宽限制,在射频通道上采用环行器、电子开关等双工器件进行上下行隔离并实现天线收发共用^[13-14]。这些射频前端器件在高功率微波脉冲作用下是否会呈现出与常规微波作用下不同的特性,这些射频前端器件对高功率微波脉冲是否有除衰减以外的效果,前人研究较少。基于此,本文开展了一射频通信基站的时分复用射频前端高功率微波脉冲波形响应研究,证实了滤波器和环形器除对高功率微波脉冲有衰减作用外,还会对其波形有特别的影响,揭示出在开展射频前端高功率微波效应研究时,不仅要关注低噪声放大器、功率放大器的高功率微波效应,还应充分考虑射频前端无源器件对高功率微波脉冲的影响。

1 环行器型时分复用射频前端结构

时分复用是指设备上下行载波频率一致,通过时间上交替完成基站和用户之间的通信。时分复用可节省频带资源、简化滤波器及天线设计,在第四代(4G)移动通信中得到了广泛应用。按照隔离度要求的不同,常用的时分双工有环行器、微波开关等。本文对采用环行器、共用天线和滤波器的时分复用长期演进体制(TD-LTE)基站射频前端开展高功率微波脉冲响应特性研究。图1为该基站射频前端内部模块的照片。可以看出,该前端由一个腔体滤波器(黑色)和两个射频处理模块(银色)组成。滤波器在射频前端内、外侧各有两个端口。外侧两个为天线空口,分别接 $\pm 45^\circ$ 极化的天线,保证基站覆盖范围内任何极化方向用户信号都能被接收;内侧两个端口通过两根蓝色半钢同轴电缆连接至两个射频信号处理模块。每个射频信号处理模块通过两根黑色同轴电缆与基站基带处理单元(BBU)相连。

下行链路由BBU开始,携带信息的射频信号由黑色电缆发送端口(TX)进入射频模块进行功率放大,经蓝色半钢电缆、滤波器、天线,向基站周围空间辐射。上行链路由用户终端(UE)产生的信号开始,经天线、滤波器、蓝色半钢电缆进入射频模块,由模块中低噪声放大器放大,经接收端口(RX)、黑色同轴电缆输出至BBU。上下行链路信号频带相同,时间上交替进行,从而实现基站与用户终端(UE)之间的通信。

图2给出了与上下行信号有关的射频模块主要射频元器件组成示意图,可以看出该前端共用天线和滤波器。在环行器处,上行信号由环行器1端口进入,通过端口2进入低噪声(LNA);下行信号由环行器3端口进入,经1端口输出至滤波器,进而由天线辐射出去。

2 环行器型时分复用前端高功率微波脉冲响应

环行器型时分复用前端高功率微波脉冲响应采用注入实验方法研究。实验系统如图3所示。其中,大功率功放输出微波脉冲经环行器1、定耦1、环行器2、定耦2进入基站射频前端其中一个天线端口。基站的输出通过定耦2、环行器2、衰减器、天线辐射到外部空间。通过定耦1前向耦合支路监测大功率发射源的发射波形,通过定耦2反向耦合支路监测基站输出波形以及可能的注入脉冲反射波形。

2.1 射频前端下行波形及频带

首先测试基站射频前端下行波形。基站预热开机,用示波器监测其下行信号波形,如图4所示。从中可以看出,基站下行宏脉冲周期约5ms,宏脉冲串宽度约2.5ms。在宏脉冲串内有微脉冲,微脉冲的周期信息不明显。捕

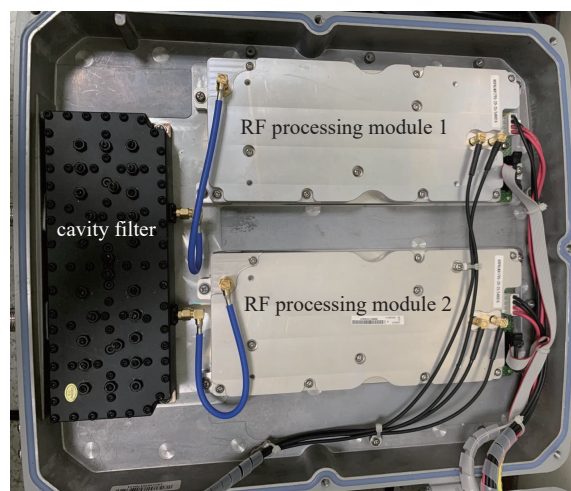


Fig. 1 Photo of the time-division multiplexing RF front end modules

图1 时分复用射频前端模块照片

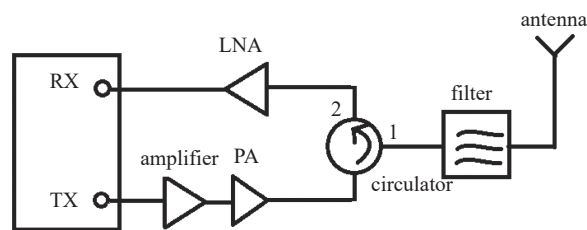


Fig. 2 Diagram of the constituent parts of the RF front end

图2 射频前端模块元器件组成示意图

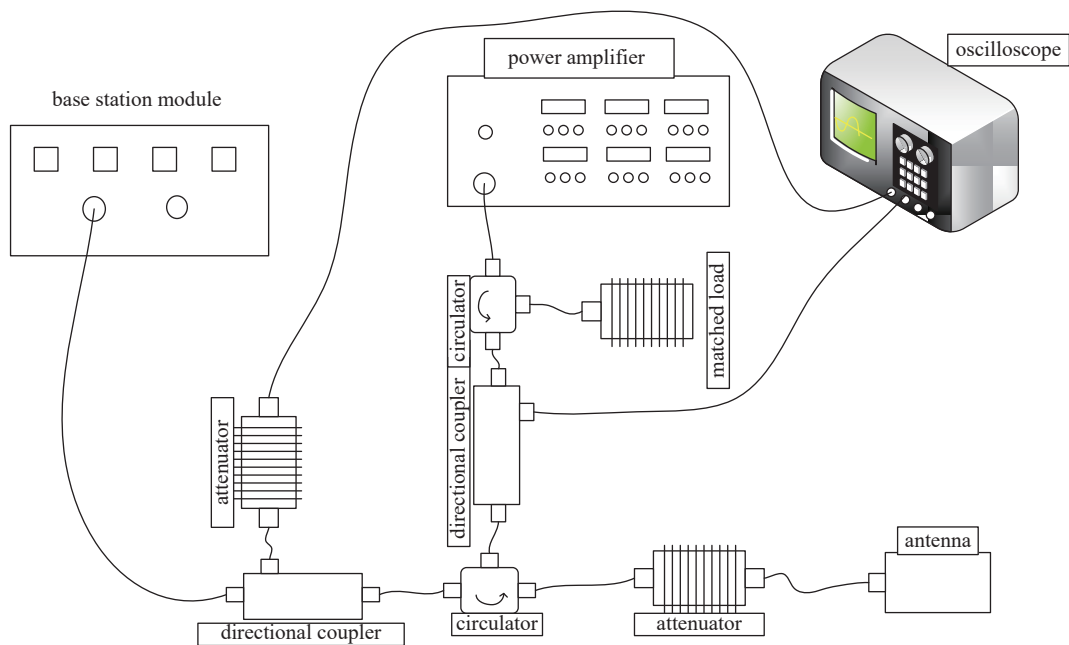


Fig. 3 Diagram of injection experiments on base station RF front end

图3 基站射频前端注入实验示意图

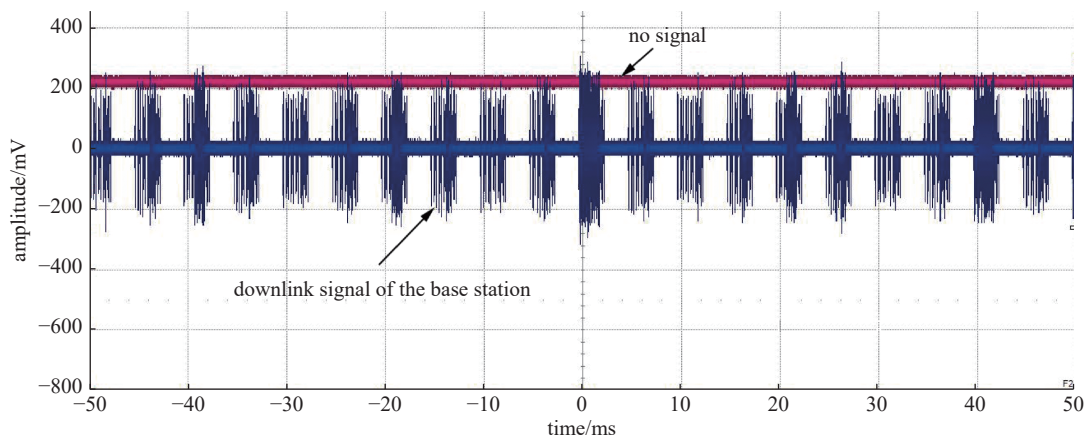


Fig. 4 Waveform of the downlink signal

图4 基站下行信号波形

提其中一个微脉冲的波形及其频谱如图5所示,可见该微脉冲脉宽约70 μs,频带宽度为1.785~1.790 GHz。

监测了不同时刻基站下行信号波形和频谱,在不同时间及不同情况下,频带在一定范围内变化,由设备说明书可知,其完整工作频带为1785~1805 MHz。选择该基站工作带宽内频点1800 MHz,依图3所示实验系统开展注入实验。注入脉冲脉宽50 ns,单脉冲方式,注入功率最高为200 W。

2.2 高功率微波脉冲带内注入脉冲响应波形

注入功率从10 mW开始,按照3 dB递增,采用示波器检测注入和反射波形。在实验中我们发现无论功率水平如何,反射波形形状总是与注入波形明显不同。以注入功率200 mW的波形为例,如图6所示,入射波为方波脉冲,反射波呈现出脉冲前后沿尖峰、脉冲中部幅值低的情形,且有振荡波从脉冲前沿开始一直持续一段时间后才消失。随着注入功率不断增大,波形细节有所不同,但总体特征基本不变,注入功率20 W时的波形如图7所示。其中CH1是定耦1上耦合出的注入脉冲波形,CH2有两个尖峰的脉冲为定耦2上监测到的反射波形。从图7中可看到,幅度调制

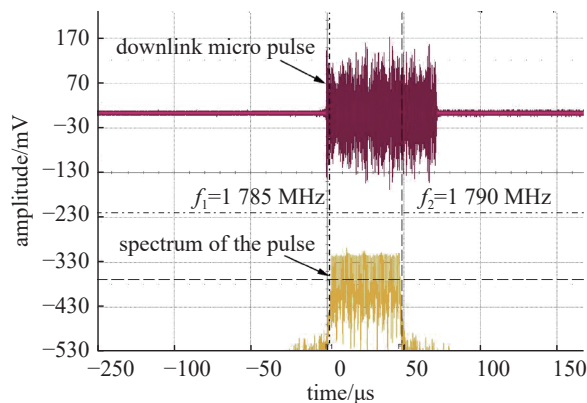


Fig. 5 Spectrum of the downlink signal

图5 基站下行信号波形及其频谱

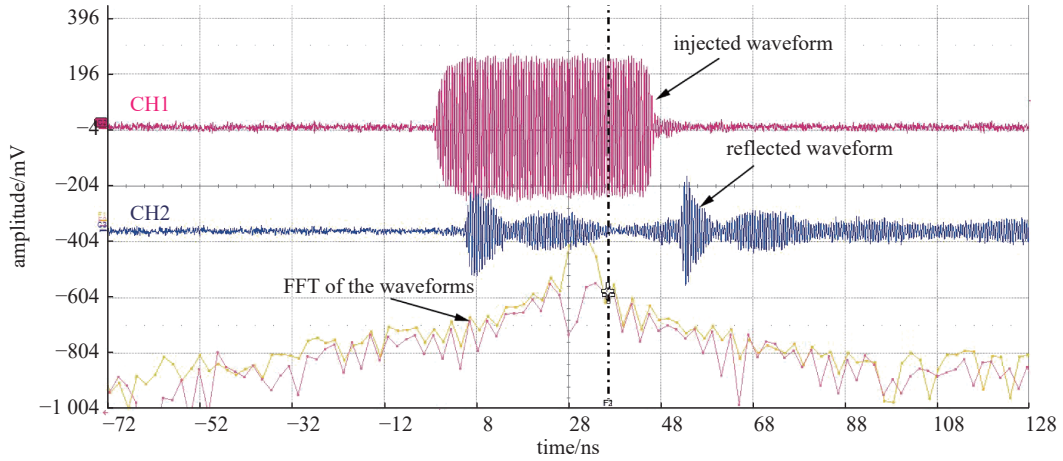


Fig. 6 Waveforms of the injected pulse and the reflected pulse under 200 mW
图 6 注入脉冲功率 200 mW 时注入与反射脉冲波形

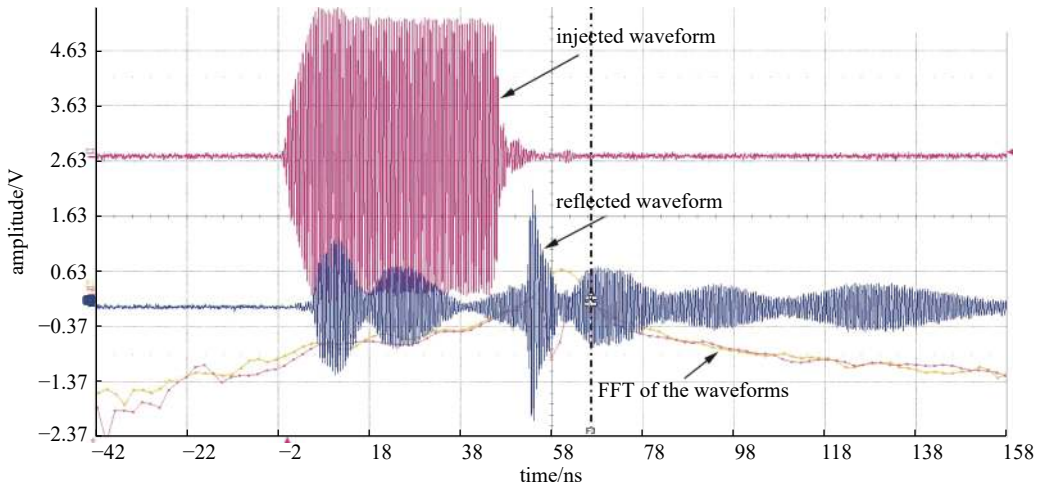


Fig. 7 Waveforms of the injected pulse and the reflected pulse under 20 W
图 7 注入脉冲功率 20 W 时注入波形与反射波形

型振荡波的幅值也随注入功率增加而增大。从图 6 和图 7 中可以看出,该基站射频前端的注入反射波形特点比较明显,即脉冲上升和下降时反射波呈尖峰状,反射较大;在脉冲中部,呈平底状,反射较小;存在一个振荡波。

为了确认图 6、图 7 中反射波形确实为注入脉冲的反射波而不是基站的下行信号波形,采用重频脉冲注入,且调节重复频率使某个注入脉冲正处于基站射频前端下行信号某个微脉冲内。通过这种方法捕捉到反射脉冲位于基站下行微脉冲内的情形,如图 8 所示。从图中可见,在注入脉冲存在时段及之后,基站下行脉冲内可见一个具

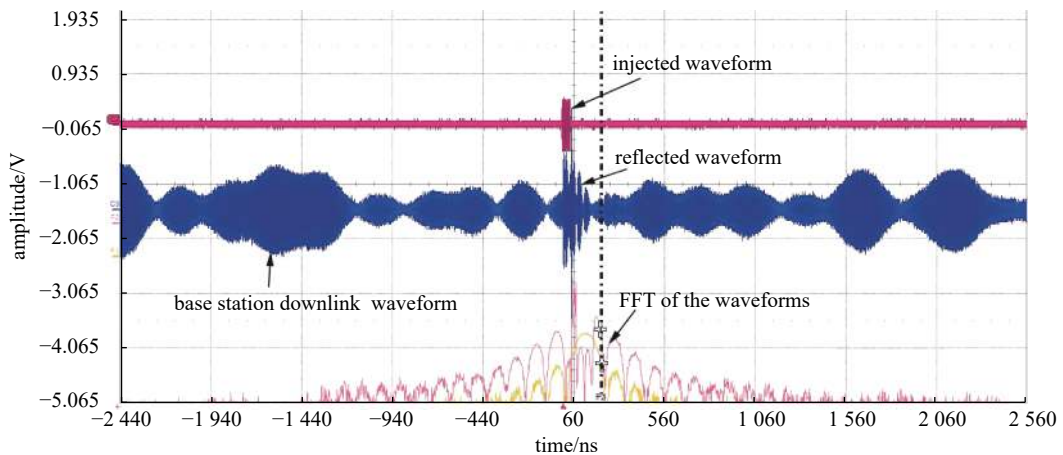


Fig. 8 Reflected pulse waveform located in the downlink micro pulses
图 8 位于下行微脉冲内的反射脉冲波形

有4个峰的脉冲(后两个峰为前述振荡波振幅), 叠加在基站正常下行输出脉冲上。该图可证明前述波形确实为注入脉冲经射频前端反射后的反射波形。

3 反射波形成因分析

如图6和图7中所示, 反射波形与低噪声放大器注入效应研究中出现的反射波形明显不同, 为定位前述波形产生的器件位置及形成原因, 分别开展了该射频前端滤波器带外和带内注入实验、滤波器单独注入实验以及射频收发模块的注入实验。研究分析认为, 射频前端滤波器是反射波形形状的成因, 而环形器的存在及其连接的低噪声、功放对注入脉冲的反射是从下行端口能够监测到发射波形的原因。

3.1 射频前端滤波器是反射波形状的成因

开展了带内和带外注入实验研究, 研究表明, 带外注入时反射波形与注入波形基本一致, 而带内注入时反射波形与注入波形明显不同。滤波器带宽为基站的工作频带, 为1785~1805 MHz。图9给出了在不同注入频率(1750 MHz、1770 MHz、1790 MHz、1800 MHz)、相同注入功率下的反射波形对比。从图9中(a)、(b)可以看出, 注入脉冲频率离滤波器工作带宽边缘越远, 反射越大, 波形也越接近于入射脉冲的方波波形。结合滤波器带外特性, 这种反射可以确定是由滤波器带外反射造成。这种情况下注入脉冲并未进入到基站射频模块内。当注入脉冲频率逐渐接近滤波器带宽边缘甚至进入滤波器工作带宽内后, 其反射波形逐渐过渡到与前述带内反射波形类似, 如图9中(c)、(d)所示。

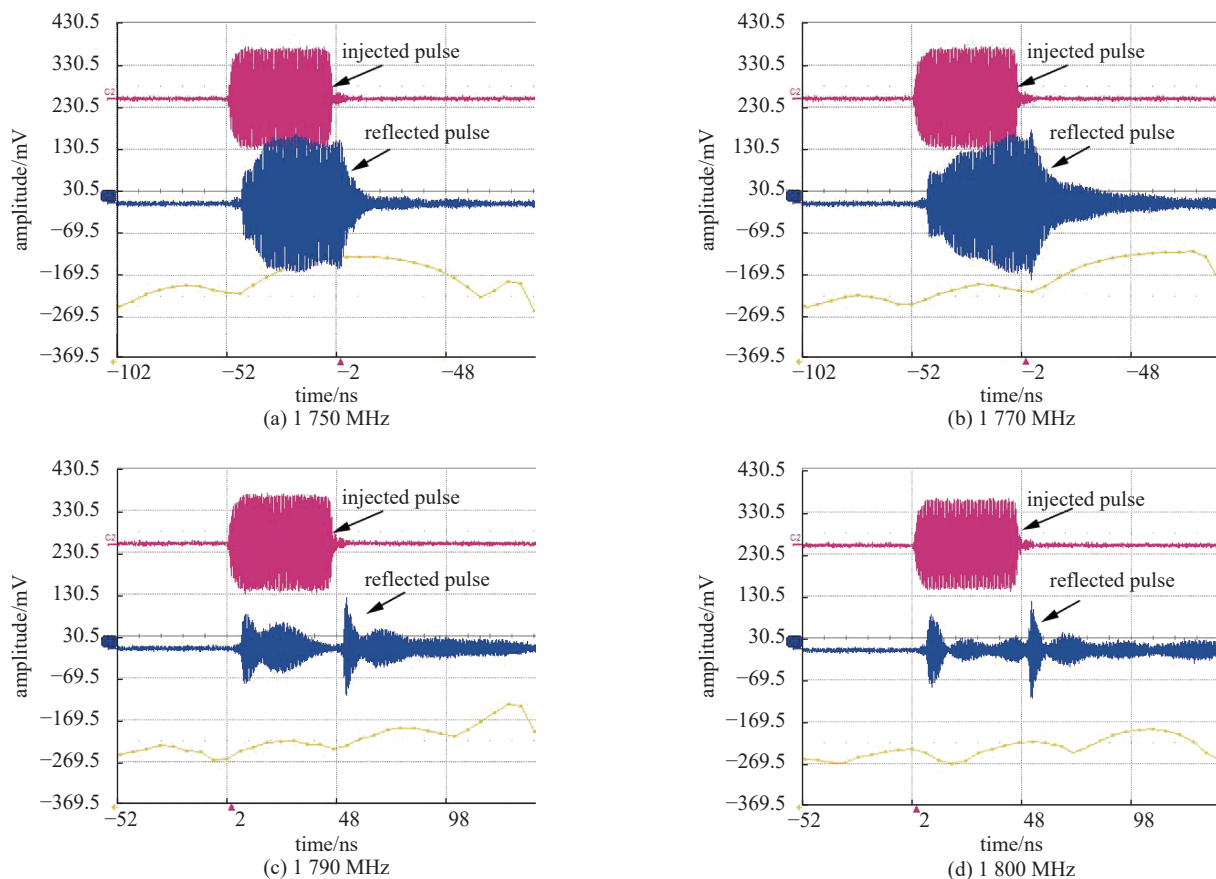


Fig. 9 Waveforms of the reflected pulses with different frequencies but same injection power

图9 同等注入功率不同频率下的反射波形

将滤波器从基站上拆下, 单独对滤波器进行带内注入实验研究。滤波器后端口分别接匹配负载和保持开路时的注入、反射波形如图10所示。可以看出, 出现了与前述波形基本一致的前后沿尖峰状的反射脉冲以及振荡波, 因此可推知前述波形的形成是滤波器造成的。

滤波器是线性时不变(LTI)系统, 对LTI系统, 其时域波形的变化均来自于不同频率成分经过LTI系统后产生的变化叠加。当一个LTI系统输入一个正弦信号时, 输出信号频率不会发生不变, 改变的只是幅值和相位。因此, 若是带内连续波通过滤波器, 其波形通过滤波器后不会发生变化。但是本文中脉冲虽然载频是特定单频, 但脉冲

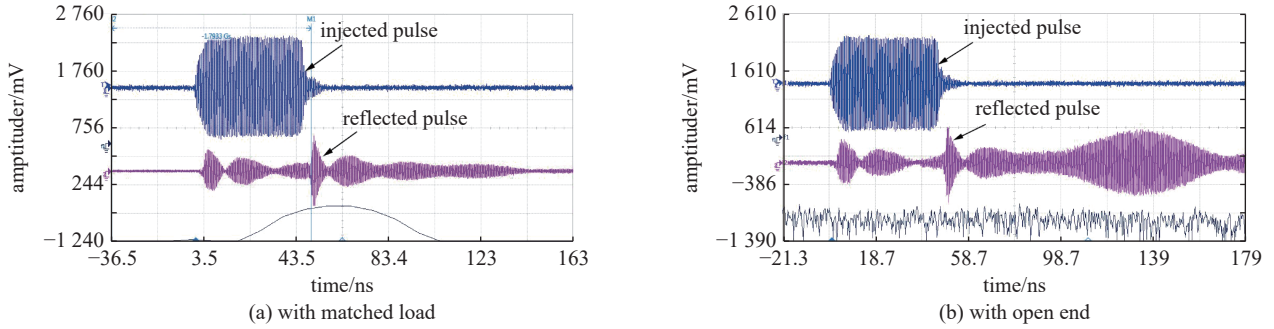


Fig. 10 Reflected waveforms of injection into filter merely

图 10 单独滤波器对注入脉冲的反射波

宽度仅为 50 ns, 其上升和下降沿部分的频率成分非常丰富, 超过滤波器带宽的频率成分占比大, 因此在上升和下降沿部分被滤波器反射得更强烈, 故反射脉冲在上升和下降沿部分可见明显尖峰。在脉冲平顶段, 载频成分占比较大, 因此被滤波器反射较小, 故反射波形在平顶段幅值较低。

关于持续时间更长的振荡波, 文献 [15] 对比研究了射频滤波器对超宽带脉冲和低功率连续波时域响应波形的异同, 认为滤波器的高 Q 值和储能特性会使超宽带脉冲的时域响应波形出现脉冲振荡特征, 造成响应波形脉冲远比原脉冲波形持续时间长的现象。本文中出现的注入脉冲反射波中的振荡波, 其时域特征上也是比注入脉冲长且呈振荡特性, 因此可以认为是滤波器的高 Q 值和储能特性造成了注入短脉冲的展宽。

3.2 射频前端环形器是反射波能够被监测的原因

将滤波器去掉, 单独对射频模块进行注入, 波形如图 11 所示。从图中可以看出, 不经滤波器的注入脉冲被射频模块反射, 波形前后沿略有畸变, 但并未出现上升沿和下降沿尖峰而脉冲中部平底的现象。但该实验证实从共用端口注入脉冲后, 可以从该口测到反射波。说明在此射频前端中, 注入脉冲被环形器联系的低噪放、功放依次反射, 最后由注入口反射输出。

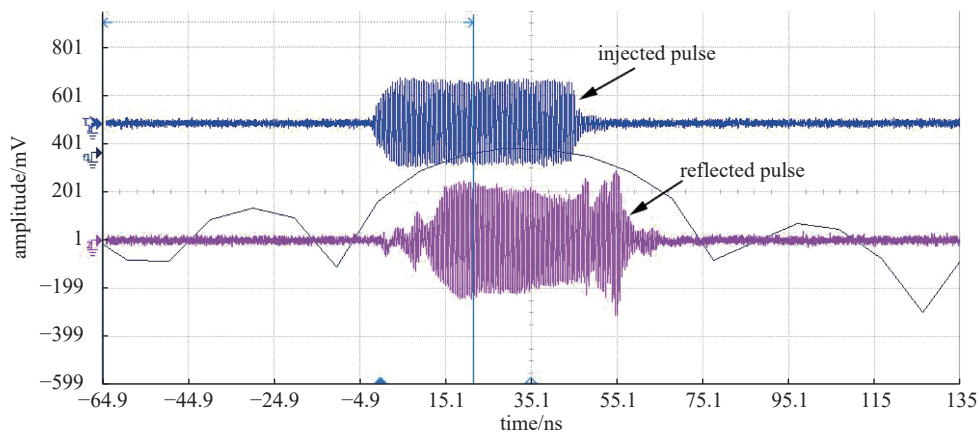


Fig. 11 Injected and reflected waveforms without filter

图 11 无滤波器的射频前端注入反射波形

通过对无滤波器的射频前端模块注入实验, 结合图 2 可以看出, 注入脉冲可由环形器 1 口经 2 口进入低噪放, 被低噪放反射, 经环形器 2 口到达 3 口功放输出端并被再次反射, 再由环形器 3 口到 1 口, 从最初注入口输出。这个现象展示了超过基站射频前端上行通道正常功率水平的注入脉冲会因环形器的环向传输特性将低噪放和功放联系起来, 且低噪放和功放均对注入脉冲产生了反射。通信基站低噪放允许的连续波输入功率一般在 10 dBm 以下, 而高功率微波通过前门耦合进入射频前端的功率往往可达 30~50 dBm, 甚至更高。在这样的功率水平下, 低噪放无法吸收全部来波, 故将大部分来波反射。在功放的输出端, 从实验中可以看到从低噪放反射过来的波被再次反射, 但其导致反射的机理尚待进一步研究。

3.3 结果讨论

根据上述分析可知, 高功率微波脉宽短, 上升下降快, 上升沿和下降沿部分丰富的带外频率成分会被滤波器反射, 从而形成脉冲上升沿和下降沿尖峰、脉冲中部平底的反射波形。这个现象也说明实际进入基站上行通道的高

功率微波脉冲上升和下降沿部分会被滤波器削弱。实验也发现, 不经滤波器进入射频模块的脉冲, 会因低噪放和功放的接续反射以及环行器的单向传输特性, 从注入口再次输出, 从而为共用天线端口、环行器型射频前端的高功率微波前门效应研究提供了监测基础。同时, 环形器的存在以及低噪放对超过正常功率水平脉冲的反射, 使下行通道的功放也面临被注入脉冲损伤的风险。

4 结 论

通过对采用环行器的时分复用基站开展整体注入实验、滤波器单独注入实验以及不带滤波器的射频模块注入实验, 本文得到了时分复用射频前端高功率微波脉冲波形响应的结论: (1) 即使滤波器带内高功率微波脉冲注入射频前端, 其脉冲上升沿和下降沿也会被滤波器强烈反射, 出现首尾尖峰、中部平底的反射脉冲形式, 造成高功率微波脉冲上升下降沿波形的剧变部分被削弱、进入前端敏感器件脉冲能量减少的现象; (2) 经滤波器后, 注入脉冲可由环行器进入上行链路低噪放, 在低噪放、功放的反射及环行器共同作用下, 反射波形可在下行链路注入口被监测到。这种现象一方面使环行器型时分复用射频前端高功率微波效应研究复杂性增加、下行通道功放面临被注入脉冲损伤的风险, 另一方面也揭示了高功率微波脉冲进入射频前端的表现与正常信号进入射频前端的表现不同, 丰富了高功率微波效应研究内容。尽管如此, 限于知识和能力水平, 本文对滤波器反射波形的解释还比较定性, 缺乏量化分析或仿真呈现; 对环行器下行通道的功放在何种情况会出现损伤, 目前尚未开展研究。今后将对上述两方面问题继续开展研究。

参考文献:

- [1] Benford J, Swegle J A. High power microwave[M]. Boston: Artech House, 1992.
- [2] 方进勇. 简明高功率微波技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022. (Fang Jinyong. Concise high power microwave technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022.)
- [3] 杨会军, 李文魁, 李锋. 高功率微波及其效应研究进展综述[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(3): 15-19. (Yang Huijun, Li Wenkui, Li Feng. A review of HPM and its effects research progress[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2013, 29(3): 15-19.)
- [4] 潘征, 刘其中, 李跃波, 等. 高功率微波缝隙耦合效应的试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1879-1882. (Pan Zheng, Liu Qizhong, Li Yuebo, et al. Test of high power microwave coupling to slot[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1879-1882.)
- [5] 涂敏, 黄文华, 李平. 微波混频器高功率微波效应等效电路建立及仿真[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(11): 2845-2849. (Tu Min, Huang Wenhua, Li Ping. Equivalent circuit establishment and simulation of microwave mixer under high power microwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(11): 2845-2849.)
- [6] 胡凯, 李天明, 汪海洋, 等. 多级 PIN 限幅器高功率微波效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 063015. (Hu Kai, Li Tianming, Wang Haiyang, et al. High power microwave effect of multi-stage PIN limiter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 063015.)
- [7] 薛沛雯, 方进勇, 李志鹏, 等. 不同频率高功率微波对高电子迁移率晶体管的损伤效应[J]. 电子设计工程, 2017, 25(19): 114-117. (Xue Peiwen, Fang Jinyong, Li Zhipeng, et al. Microwave damage susceptibility trend of a high electron mobility transistor as a function of frequency[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(19): 114-117.)
- [8] 王明. PIN 限幅器高功率微波重复脉冲效应机理研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018. (Wang Ming. Study on the mechanism of high-power microwave repetitive pulse effect of PIN limiter[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2018.)
- [9] 张存波, 王弘刚, 张建德. 高电子迁移率晶体管微波损伤仿真与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 063014. (Zhang Cunbo, Wang Honggang, Zhang Jiande. Simulation and experiment research on high electron mobility transistor microwave damage[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 063014.)
- [10] 柴常春, 张冰, 任兴荣, 等. 集成 Si 基低噪声放大器的注入损伤研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(5): 898-903. (Chai Changchun, Zhang Bing, Ren Xingrong, et al. Injection damage of the integrated silicon low-noise amplifier[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(5): 898-903.)
- [11] 马振洋, 柴常春, 任兴荣, 等. 双极晶体管微波损伤效应与机理[J]. 物理学报, 2012, 61: 078501. (Ma Zhenyang, Chai Changchun, Ren Xingrong, et al. The damage effect and mechanism of the bipolar transistor caused by microwaves[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61: 078501.)
- [12] 范菊平. 典型半导体器件的高功率微波效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. (Fan Juping. Study on the high power microwave effects on typical semiconductot devices[D]. Xian: Xidian University, 2014.)
- [13] 宋春峰. 射频前端在高功率毫米波辐射下的非线性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018. (Song Chunfeng. Nonlinear study of RF front-end in high power millimeter wave[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)
- [14] 余世里. 高功率微波武器效应及防护[J]. 微波学报, 2014, 30(S2): 147-150. (Yu Shili. High power microwave weapons effect and hardening[J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(S2): 147-150.)
- [15] 陆希成, 邱扬, 武静, 等. 超宽带脉冲环境下射频滤波器非线性响应分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 033201. (Lu Xicheng, Qiu Yang, Wu Jing, et al. Analysis on nonlinear response of RF filter under ultra wide band pulse environment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 033201.)