0254-6124/2023/43(1)-0183-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHOU Li, MA Xiaoyong, WU Lin, YAN Jingye, AN Junshe. Electromagnetic Interference Suppression Technology for Switching Converters of Onboard Secondary Power Supply (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(1): 183–189. DOI:10.11728/cjss2023.01.210922100

星载开关电源的电磁干扰抑制技术*

周 莉 马晓勇 武 林 阎敬业 安军社

(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘 要 电磁干扰（EMI）抑制技术是保证航天器各功能单元正常运行互不干扰的重要技术。开关电源是航天器内电磁干扰的主要来源。基于对星载开关电源 DC/DC 和负载点电源 POL 电磁干扰特性的测试结果，提出了一种星载二次电源系统的电磁干扰抑制方案，采用高稳晶振+控制器+时钟管理芯片硬件与软件设计结合的方法，利用高稳晶振为电源模块提供稳定时钟，通过控制器实现时钟管理芯片的分频和时钟分配。系统以非同步方式上电，软件控制时钟管理芯片输出电源模块同步时钟，然后软件打开时钟同步的使能，实现星载开关电源（DC/DC 和 POL）开关频率的外同步，最后通过测量输出电压频谱的方法验证了电磁干扰抑制方案的有效性。

关键词 电磁干扰抑制，同步时钟，开关电源，点负载电源

中图分类号 TN86，V242.2

Electromagnetic Interference Suppression Technology for Switching Converters of Onboard Secondary Power Supply

ZHOU Li MA Xiaoyong WU Lin YAN Jingye AN Junshe

(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

Abstract Electromagnetic Interference (EMI) suppression technology is an important technology to ensure that all spacecraft functional units can work normally together. The EMI in spacecraft comes mostly from the switching converters, DC/DC and the point-of-load POL. Ground tests for the EMI characteristics of the onboard switching converters are conducted. Based on the test results, an electromagnetic interference suppression design for the onboard power supply system is proposed, in which the hardware consists a highly stable crystal oscillator, a controller, a clock programmable buffer and some clock drivers, to provide a highly stable external synchronization clock for the switching converters. Meanwhile, the software design to realize a stable clock and power-on sequence control are introduced. All DC/DC and POL are working in the synchronization mode, in which the switching clocks are from

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项资助（XDA15020200）

2021-11-12 收到原稿，2022-04-29 收到修定稿

E-mail：zhouli@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

external clock drivers. Finally, the feasibility and effectiveness of the EMI suppression design is verified by the method of measuring the output voltage spectrum.

Key words Electromagnetic Interference (EMI) suppression, External synchronization clock, Switching converters, DC/DC point-of-load

0 引言

开关电源 DC/DC 是航天器电源系统的核心电压转换器件。目前航天器综合电子正常工作需要的二次电源主要是由卫星电源系统一次电源通过 DC/DC 转换而成的,这是目前的成熟电源技术。另外,随着大规模集成电路在航天器上的广泛应用,负载点电源 POL 以其大电流、高效率、小体积的优势得到越来越多的应用。DC/DC 和 POL 都属于开关电源,采用脉冲宽度调制(PWM)技术,其开关器件由于高频通断产生的电磁干扰(EMI)信号经过传导和辐射后会污染星上的电磁环境,尤其会严重影响电磁场和电磁波探测类载荷[1, 2]。

以空间科学先导卫星二期背景型号预研项目“超长波天文观测阵列”[3,4]为研究背景,超长波天文观测阵列的主载荷——低频干涉成像谱仪工作频段为 0.1～30 MHz,对星上 0.1～30 MHz 的 EMI 要求高。试验表明,开关电源模块产生的电磁干扰是星上低频干扰的主要来源,正好落在低频干涉成像谱仪的观测频段内,会直接影响在轨观测数据的可用性,必须对电源系统进行 EMI 抑制[5]。

本文根据对星载开关电源 DC/DC 和负载点电源 POL 电磁干扰特性进行的测试,提出一种星载电源系统电磁干扰抑制方案,采用高稳晶振+控制器+时钟管理芯片的硬件与软件设计相结合的方法,实现开关电源开关频率的外同步功能,并通过试验验证了开关电源电磁干扰抑制方案的有效性。

1 开关电源的工作原理与 EMI 特性

DC/DC 变换器电路工作原理如图 1 所示。输入的直流电压首先经辅助供电模块为 PWM 控制器(脉宽调制器)提供工作电源,PWM 控制器产生功率转换部分(MOS 管)的驱动信号;输入电源经过输入滤波后,在 PWM 控制器的控制下功率 MOS 管高速地导通和截断完成实现电平的转换,经变压器隔离耦合,再进行整流、滤波后输出。为了实现输出电压的稳定,对输出电压直接取样,经与基准电压的比较、放大及隔离反馈后,调节 PWM 控制器的占空比,实现输出电压的闭环控制[6]。

电源模块的开关频率默认是内置的 LC 振荡电路产生的,开关频率一般从几十 kHz 到几百 kHz,内部

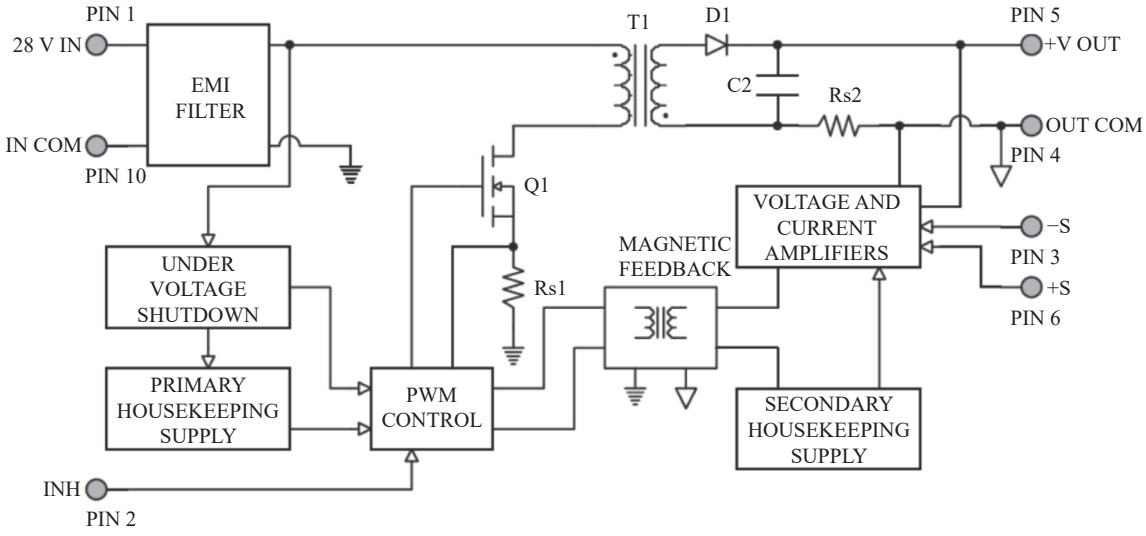

图 1 DC/DC 变换器电路工作原理

Fig. 1 DC/DC block diagram

开关频率的稳定性将影响输出的频谱[7,8]。供电电源的电磁干扰(EMI)信号经过传导和辐射后,会严重影响电磁场和电磁波探测类载荷的科学探测。这里对开关电源 DC/DC 和 POL 的 EMI 特性进行摸底测试,为后续对电源进行针对性的 EMI 抑制提供实验数据;试验采用频谱仪对开关电源 DC/DC 和 POL 电压输出的频谱特性进行测量。

图 2 所示为宇航级 DC/DC 使用内部开关频率工作时,在 25.5～29.5 MHz 频段内输出频谱特性。图 3 所示为宇航级 POL 使用内部开关频率工作时的频谱,图 3(a)为一片 POL 工作时电压输出在 5.76 MHz 频段内的频谱特性;图 3(b)为两片 POL 工作时电压输出在 28～30 MHz 频段内的频谱特性,两片 POL 的频点相互叠加形成宽带干扰。可以推测,当有多片 POL 同时工作时,会存在多种频点相互叠加交调,将加重整个单机的频谱干扰。

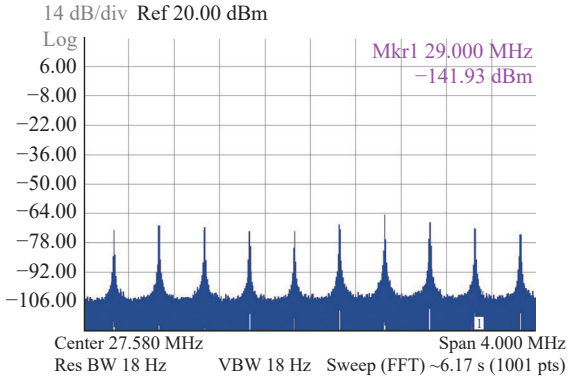

图 2　DC/DC 在 25.5～29.5 MHz 频段内的频谱

Fig. 2　Frequency spectrum of one DC/DC in 25.5～29.5 MHz band

DC/DC 的内部开关频率频谱如图 4(a)所示,频点为 397.8 kHz,其谐波干扰为严格的开关频率倍频,但由于内部 LC 作为频率源的相噪较差,导致高频段的谐波变为几十 kHz 的宽频干扰(见图 2)。

POL 的内部开关频率频谱如图 4(b)所示。被测芯片的开关频率为 479.86 kHz,与 DC/DC 不同的是,POL 的开关频率不稳定,在几 kHz 范围内随机抖动,这将导致其谐波干扰在高频段出现几十 kHz 的宽带干扰特征,如图 3 所示。POL 谐波干扰在高频段时已不再是点频干扰,而是具有一定包络形状的宽带干扰,因此 POL 的干扰比 DC/DC 更为严重。

DC/DC 和 POL 内部电感、电容参数的个体差异及温漂如图 5 所示(POL 的开关频率随温度的变化约有十几 kHz),造成 DC/DC 和 POL 具有内部开关频率不一致以及开关频率相噪差的缺点[9,10],导致开关电源频率干扰的离散并且各次谐波频率之间的叠加和交调;开关电源在高频段的谐波干扰表现为宽带干扰,而不再是点频干扰。

电磁场和电磁波探测类载荷自身的供电 EMI 干扰是需解决的关键问题之一,对电源 EMI 的要求是,干扰点频尽可能少,不允许宽带和不确定干扰,这样无法用定标的方法去掉底噪。这里采用外同步时钟的方法,使多个 DC/DC 与 POL 工作在同一高稳开关频率上,最大程度减少开关频率种类与开关频率之间的叠加交调。

2　系统设计

采用一种低 EMI 的星载二次电源系统设计,旨

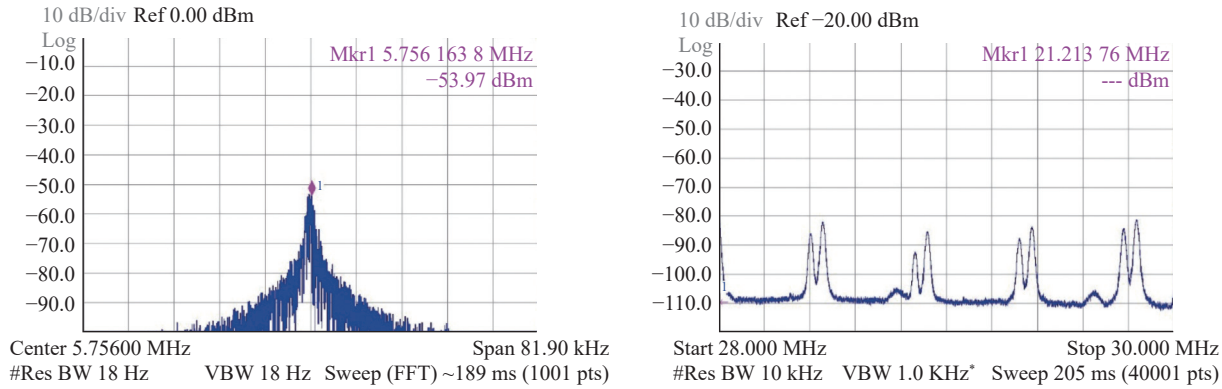

图 3　一片 POL 在 5.76 MHz 的频谱特征(a)和两片 POL 在 28～30 MHz 的频谱特征(b)

Fig. 3　Frequency spectrum of one POL in 5.76 MHz (a) and frequency spectrum of two POLs in 28～30 MHz band (b)

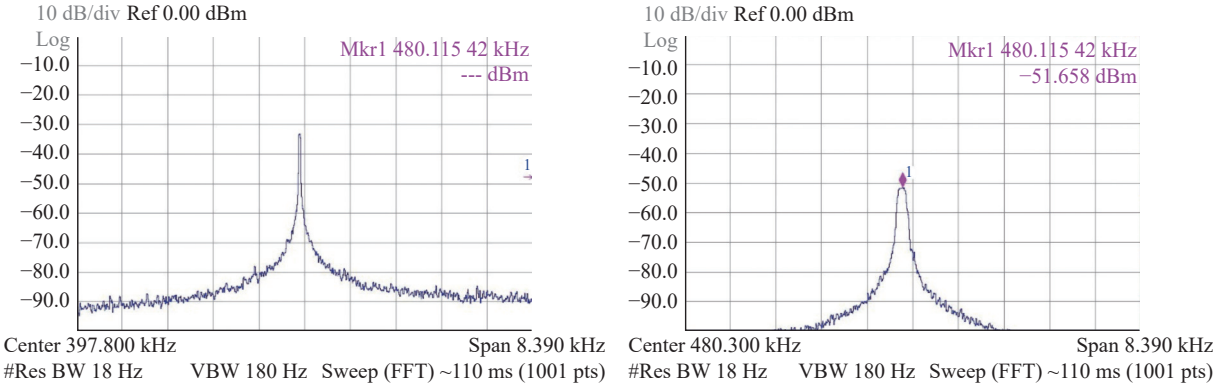

图 4 采用内部开关频率的 DC/DC（a）和 POL（b）开关频率谱特征

Fig. 4 Frequency spectrum of a DC/DC in the internal clock mode (a) and frequency spectrum of a POL in the internal clock mode (b)

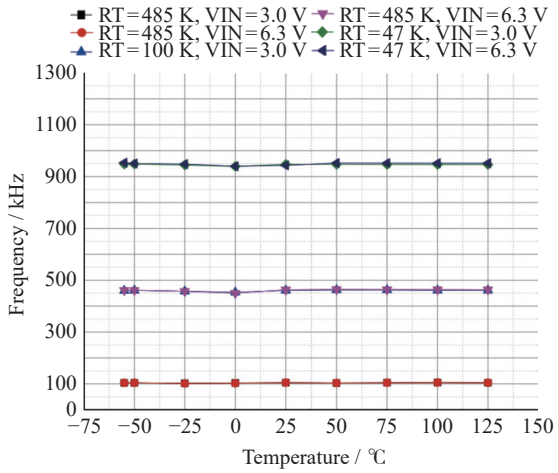

图 5 POL 内部开关频率随温度的变化曲线

Fig. 5 Switching frequency curve of one POL with different temperatures

在让多片 DC/DC 和 POL 的开关频率工作在统一的高稳时钟内。系统设计包括硬件设计和软件设计，其中硬件设计用于电源转换、相关驱动和控制电路，软件设计用于统一时钟的产生和使能控制。硬件系统设计如图 6 所示，包括输入保护和滤波电路、长加电电路、同步时钟产生电路、同步和使能驱动电路、电压输出电路等。本系统设计尤其适用于低母线电压（+12～+15 V）的微小卫星，也可以通过增加一个公用 DC/DC 模块产生通用的+12 V 电压用于同步和使能驱动电路，同样适用于常规一次卫星母线（+24～+33 V）。

下面分别对硬件和软件设计进行具体说明。

2.1 硬件设计

输入保护和滤波电路：对输入的母线电压经并联熔断器保护、浪涌抑制和滤波器处理后，输出滤波至长加电电路和电压输出电路。

长加电电路：将输入母线电压转换为不同电压，为星上需要直接加电的功能单元提供二次电源，如计算机单元、存储单元、遥测遥控单元等；同时为同步时钟产生电路、同步和使能驱动电路以及电压输出电路提供工作电压。DC/DC 开关频率一般是几百 kHz，典型值是 400～600 kHz；POL 开关频率较宽，一般是几百 kHz 到几 MHz。开关频率会影响 DC/DC 和 POL 的转换效率。图 7 所示为某宇航级 POL 分别在 500 kHz 和 800 kHz 开关频率下的常温效率曲线，切换频率高，效率稍有降低，例如 5 V 转 3.3 V 工作电流为 1 A 时，开关频率 500 kHz 时效率为 95%，开关频率 800 kHz 时效率为 92%。为统一时钟频率，设计中将 DC/DC 和 POL 的开关频率统一为 500 kHz，在此频率下，常用的宇航级 DC/DC 和 POL 均可正常工作，且转换效率损失很小，可以忽略。

同步时钟产生电路：用于产生 DC/DC 和 POL 的工作频率源，由高稳晶振、时钟管理芯片、总线驱动器、FPGA/CPU 组成。DC/DC 和 POL 500 kHz 的切换频率相对于数字电路常用的几十 MHz 工作频率而言很低，需要一个时钟管理芯片进行分频，这里不采用 FPGA 直接分频，这是因为 FPGA 的时钟模块输出相噪相对于原高稳晶振会变差很多，而且在高低温下变化量更大。时钟管理芯片主要用于分频，输出高质量的 500 kHz 开关时钟；常用的时钟管理芯片分频数一般通过 SPI 口进行配置和控制，因此还需要配置一个 FPGA/CPU 进行时钟管理芯片的控制。同时 FPGA/CPU 还对整个系统的上电顺序和同步

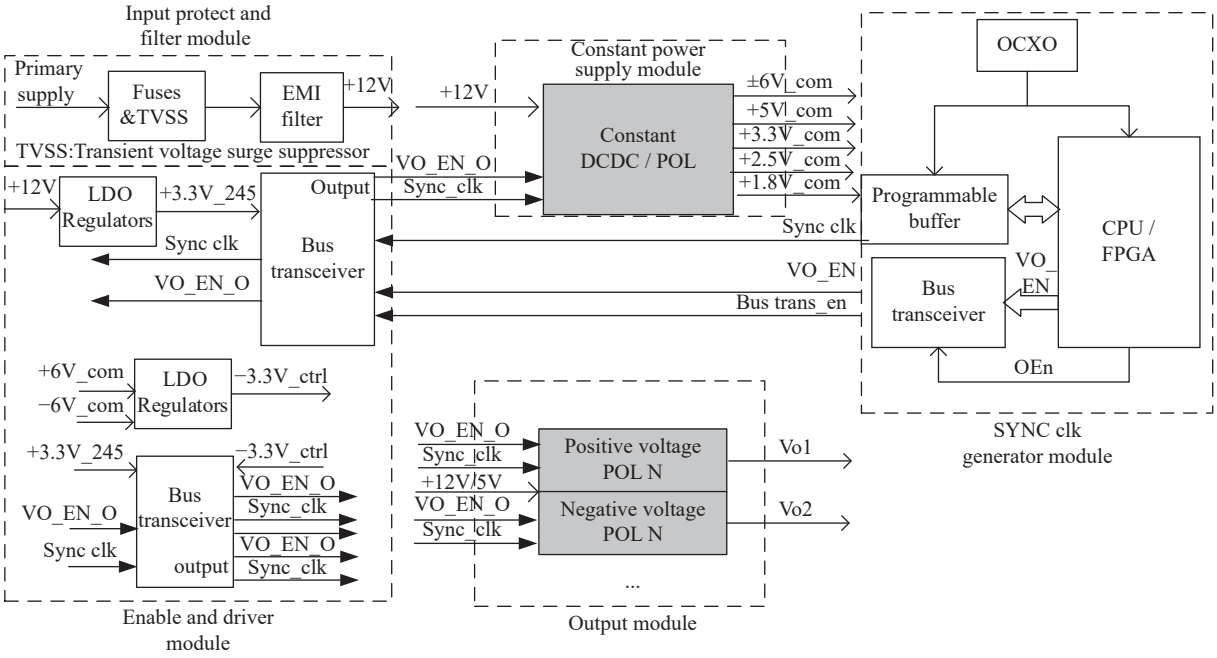

图 6　低 EMI 的星载二次电源系统设计

Fig. 6　Hardware design for the EMI suppression onboard power supply system

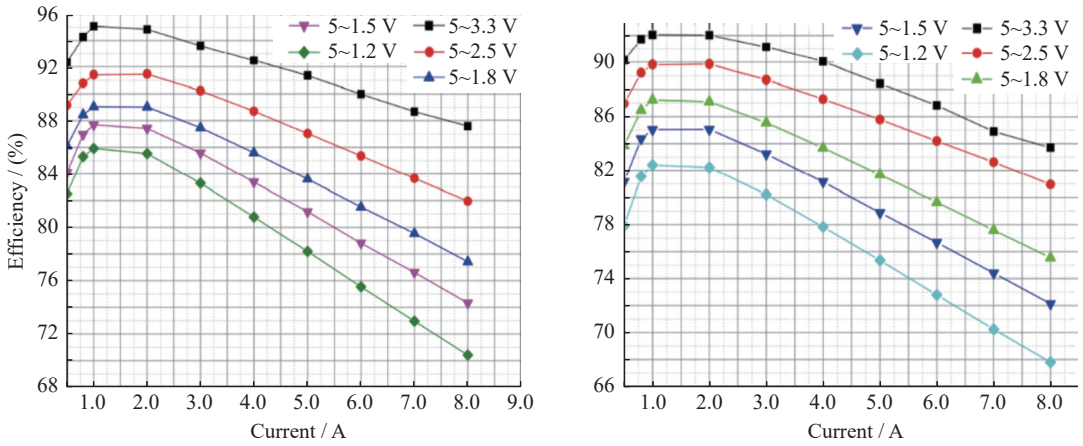

图 7　POL 分别在 500 kHz（a）和 800 kHz（b）开关频率下的常温效率曲线

Fig. 7　Switching efficiency curves of one POL with different electric currents at 500 kHz (a) or 800 kHz switching frequency (b)

使能进行控制。这里 FPGA/CPU 并不是电源单元专用的, 可以与计算机等单元共用晶振、FPGA 和 CPU。

同步和使能驱动电路: 根据同步时钟产生电路输出的时钟信号和 IO 使能控制, 经过电平转换和隔离芯片转换成适合驱动电源芯片的使能和同步时钟信号, 输出给后面的长加电电路和电压输出电路, 实现长加电电路和电压输出电路的时钟同步和使能控制。

电压输出电路: 在使能信号、负压使能信号和同步信号的控制下, 分别输出不同的电压, 为卫星平台多种设备提供二次电源。

同步和使能驱动电路主要由正压线性稳压器(LDO)、负压线性稳压器(LDO)、总线驱动器和隔离芯片组成。正压 LDO 直接将输入电压+12 V 转换为总线驱动器需要的 +3.3 V; 负压 LDO 将长加电电路输出的±6 V 转换为–3.3 V 给隔离芯片供电; 总线驱动器 16245 在长加电电路和同步时钟产生电路正常工作后, 输出控制器(FPGA/CPU)发送的 IO 使能控制和同步时钟至隔离芯片, 上电时默认不使能模式,

当长加电电路的控制器和时钟管理芯片正常工作后再打开门控；隔离芯片主要用于负压的门控和时钟同步信号的隔离及电压转换，实现负电压电路的开关控制和时钟同步，由于同步时钟产生电路生成的使能信号与同步时钟电平不匹配，不能控制负压的 POL。

2.2 软件设计

所提出的低 EMI 星载二次电源系统是一个典型的输出控制输入电路，需要通过软件控制电源模块开关频率的同步。系统上电顺序控制流程如图 8 所示。从图 8 可以看出，卫星平台给系统上电，长加电电路输出通用的二次电压，例如 +6 V, –6 V, +5 V, +3.3 V, +2.5 V, +1.8 V 给系统各功能单元，同时同步和使能驱动电路中的+3.3 V, –3.3 V 电源上电；长加电功能单元中，计算机板的时钟管理芯片和控制器 FPGA/CPU 上电完成初始化；控制器 FPGA/CPU 依次打开本板和二次电源板上的 16245 门控，然后打开同步和使能驱动电路中对应的同步时钟和使能控制，此时同步和使能驱动电路输出同步时钟和使能信号给长加电电路和电压输出电路，使其统一到同一个同步时钟上，由此完成整个电源系统开关频率的同步。

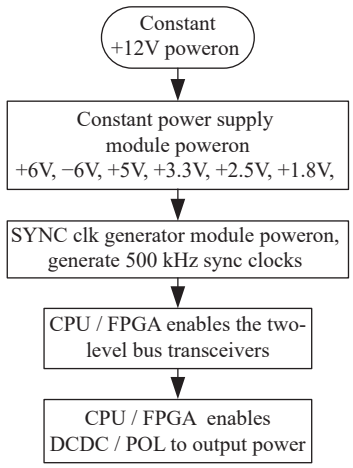

图 8 低 EMI 星载二次电源的上电顺序控制流程

Fig. 8 Power-up control flow chart for the EMI suppression onboard power supply system

时钟管理芯片的初始化即进行分频系数的设置，一般由控制器 FPGA/CPU 通过 SPI 口进行配置。

3 试验验证

采用本文设计的低 EMI 二次电源板，对 DC/DC 和 POL 的 EMI 特性进行测试，分为使用和不使用 500 kHz 同步频率源两种工况进行测试，结果如图 9 所示。图 9(a)图给出的是 DC/DC 使用内部 LC 频率源在 20～30 MHz 频率范围内的 EMI 特性，可以看到约在 500 kHz 有一个频谱混叠，表现为宽带干扰；图 9(b)使用了同步 500 kHz 频率源，可以看到宽度干扰可以忽略，两个频点之间频带干净，可用于低频探测。将两个图中的数据放到 Matlab 中进行对比，结果如图 10 所示，可以更加清晰地看到同步后频谱的变化，宽带干扰变为多个点频。

图 11(a)给出的是 POL 使用内部 LC 频率源在 20～30 MHz 频率范围内的 EMI 特性，可以看到存在宽带干扰，而且因为 LC 频率源的不稳定，在高频处频谱比较杂乱；图 11(b)使用了同步 500 kHz 频率源，可以看到干扰变为多个点频，两个点频之间频带干净。

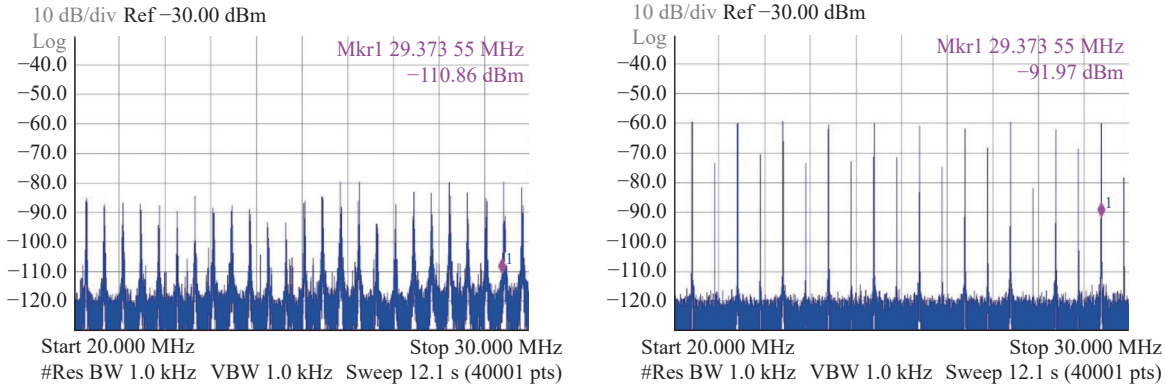

图 9 不同工作模式下 DC/DC 输出频谱的对比。（a）内部频率源模式，（b）外部同步频率源模式

Fig. 9 Frequency spectrum of one DC/DC in different modes. (a) In the internal clock mode, (b) in the external synchronization mode

4　结语

EMI 抑制技术是星载电源设计的关键技术之一。本文提出一种低 EMI 的星载二次电源系统设计，采用高稳晶振+控制器+时钟管理芯片的方案，通过软硬件结合的方法实现了星载开关电源（DC/DC 和 POL）开关频率的外同步，有效抑制了开关电源宽频干扰，满足超长波天文观测阵列中低频探测载荷对电源 EMI 干扰频点少、宽频干扰少的要求。本方法可以拓展应用于对系统 EMI 要求高的科学探测任务中。

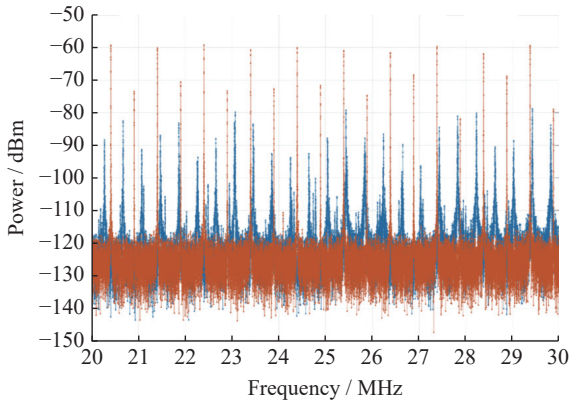

图 10　一片 DC/DC 输出频谱对比。蓝色代表内部频率源模式，红色代表外部同步频率源模式

Fig. 10　Frequency spectrum of one DC/DC in the internal clock mode (blue curve) versus in the external synchronization mode (red curve)

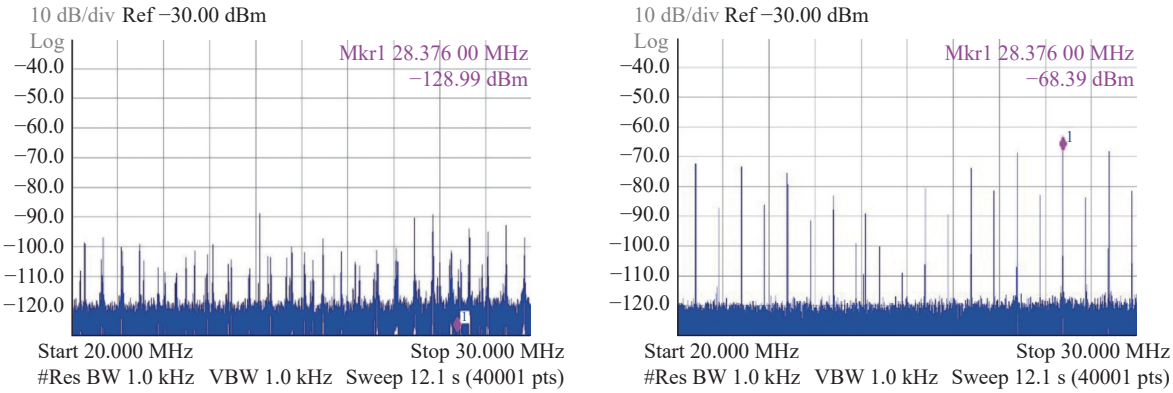

图 11　一片 POL 不同频率源工作模式下的输出频谱对比。内部频率源模式（a），外部同步频率源模式（b）

Fig. 11　Frequency spectrum of one POL in different modes. (a) In the internal clock mode, (b) in the external synchronization mode

参考文献

[1] ZHOU Chao, LI Chunmao, ZHU Feng, *et al*. Electromagnetic compatibility study of switching mode power supply[J]. *Telecom Power Technologies*, 2004, **21**(2): 16-19

[2] MENG Jin, MA Weiming, ZHANG Lei, *et al*. Method for analysis and modeling of conducted EMI in switching power converters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, **25**(5): 49-54

[3] CHEN Xuelei. Exploring the 21 cm cosmology: the Tianlai and Hongmeng experiments[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(11): 1385-1398

[4] CHEN X L, YAN J Y, DENG L, *et al*. Discovering the sky at the longest wavelengths with a lunar orbit array[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2021, **379**(2188): 20190566

[5] ZHANG Jinxiu, CHEN Xuelei, CAO Xibin, *et al*. Formation flying around lunar for ultra-long wave radio interferometer mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(2): 158-165

[6] YANG Xiaojing. The Research and Design of High Frequency Switching Power[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011

[7] WANG Xiaowen, KANG Ting, KANG Duangang, *et al*. Design of input filter for switching power supply and its conduction interference suppression[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, **44**(12): 1822-1825,1830

[8] CHEN Baoxiang, ZHU Zhibo, HUANG Junshuo, *et al*. Research on power conducted EMI analysis and suppression methods[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, **19**(4): 70-74

[9] CHEN Han. Study on Construction Method and Temperature Characteristics of Broadband EMI Filter Model[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2021

[10] BAI Wanning. Research on the Key Technologies of Electromagnetic Interference Noise Analysis and Suppression of Switching Power Supply[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020