

支持多种飞船交会对接的数据分级管理方法

陆 岚, 詹盼盼, 王红光, 孙 勇

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 针对目标飞行器与不同飞船组合体交会对接时, 作为信息管理主控方, 需支持不同类型数据可靠传输、遥测模式迅速切换、多种类复杂数据流复接下行的数据管理难题, 提出了一种支持多种飞船交会对接的多网络数据分级管理方法; 该方法包含组合体网络拓扑设计、对接总线协议复用、遥测管理实现策略和分级网络管理等方面的内容, 结合软硬件设计, 从系统层面给出了数据管理解决方案, 既能够保证空间实验室、载人飞船、货运飞船独立运行的可靠性和安全性, 又可兼顾交会对接组合体数据通信和管理的灵活性和可扩展性; 该方法已经在空间实验室数管分系统得到了应用, 并通过了空间实验室与载人飞船和货运飞船共 4 次交会对接组合体的长期飞行实验, 充分验证了方法的有效性和可靠性。

关键词: 载人飞船; 货运飞船; 交会对接; 数据管理; 网络

A Multi-networks Stage Data Handling Method Supporting Rendezvous and Docking with Various Spaceships

Lu Lan, Zhan Panpan, Wang Hongguang, Sun Yong

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: To meet the requirements of the target spacecraft for rendezvous and docking, supporting reliable data transmission of different types, telemetry modes switching, and complicated data flow downlink, a multi-networks stage data handling method is proposed to support rendezvous and docking with various spaceships. Including network topology of the complex, docking bus protocol reuse, telemetry handling strategy and stage networks managing, combined with the software and hardware design, the data management solution is given from the system level. The method is able to guarantee either the reliability and safety of Spacelab, Manned Spaceship and Cargo Spaceship in stand-alone mode, or the flexibility and scalability of the data communication and management of the complex. After applied in the OB-DH system of Spacelab, the method has been validated by the the long-time flight experiments of four rendezvous and docking complexes of Spacelab, Manned Spaceship and Cargo Spaceship.

Keywords: manned spaceship; cargo spaceship; rendezvous and docking; data handling; networks

0 引言

我国于 2011 年起发射了天宫一号目标飞行器, 并在轨与三艘载人飞船执行了多次交会对接^[1-3]。在此期间, 天宫一号目标飞行器数管完成了国内首次组合体信息管理任务。

随着航天领域需求迅速发展, 与单一航天器对接已不能满足要求。我国后续将逐步发射空间实验室、载人飞船、货运飞船。空间实验室将作为目标航天器实现与载人飞船和货运飞船的交会对接, 并执行不同任务。为此空间实验室数管除了需实现本航天器的数据管理、指令控制、飞行程序控制、仪表显示数据组织等功能^[4]以外, 还要具备与不同种类航天器的组合体信息管理能力。包括与载人飞船相关的遥测合路、遥控分发、航天员手控指令互传^[5-6], 以及与货运飞船相关的操作过程控制、信息互传等。文献 [5] 和文献 [6] 中描述了载人飞船在与目标飞行器交会对接过程中和组合体状态下的数据管理解决途径和交会对接信息流可靠性设计, 但未提及组合体信息管理的主控方目标飞行器的数据管理方案。

国际空间站^[7]作为国外航天器组合体的典型代表, 实现了多舱段的组合体管理。国际空间站采用一个 100Mbps 的 FDDI

(fiber distributed data interface, 光纤分布式数据接口) 网络, 用于整个空间站的控制, 称为核心网络。核心光纤网络通过路由器与各舱段进行信息交流。以光纤网络作为舱间数据传输通道更适应于多个舱段的组合体并且舱间数据流量在 1 Mbps 以上的复杂信息系统; 而舱间数据流量较小且传输信息可靠性要求较高的组合体更适合采用 1553B 总线作为舱间数据传输总线。

国内航天器组合体舱间传输数据流量较小, 一般小于 100 Kbps, 普遍采用 1553B 作为舱间数据传输总线。最早的目标飞行器只能支持与单一类型航天器对接; 之后的 CE-5 探测器由四个子系统组成, 只有组合体到各子系统独立飞行模式的切换, 也不能支持与不同种类航天器的对接。综上, 以 1553B 总线作为信息交互通道, 支持同一目标航天器与不同种类航天器可靠对接, 并执行不同的组合体信息管理功能, 这在以往的国内外航天领域都没有先例。

为弥补这一研究空白, 本文提出了一种支持多种飞船交会对接的多网络数据分级管理方法, 包含网络拓扑设计、对接总线协议复用、遥测管理实现策略、多网络数据分级管理等。该方法可满足空间实验室作为目标航天器, 与载人飞船和货运飞船进行多次对接和分离, 并完成不同组合体信息管理功能的崭新需求。更能够支持数据源种类多, 数据流量差异大的航天器组合体的数据复接下行。该方法已应用于空间实验室数管, 并通过了长期在轨飞行实验, 验证了该方法的正确性和可靠性。

收稿日期: 2017-10-31; 修回日期: 2017-12-06。

作者简介: 陆 岚(1975-), 女, 浙江镇海人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事航天器数管分系统设计方向的研究。

1 组合体信息管理需求分析

空间实验室在轨飞行期间,需先后与载人飞船和货运飞船分别交会对接形成组合体。空间实验室数管需作为主控方,实现与载人飞船组合体和与货运飞船组合体的不同信息管理功能,同时也需具备独立飞行信息管理的能力。

空间实验室与不同飞船的快速对接和分离过程中,如采用双方平台 1553B 总线网络直接并网,总线的阻抗瞬间不匹配或一方总线故障会直接影响双方总线通信;另外直接并网方式会使空间实验室、载人飞船、货运飞船三方的平台信息流设计和总线协议设计都具有耦合性,造成系统灵活性下降。此外,与不同飞船对接的组合体需要对多种类复杂数据进行存储和复接,包括空间实验室遥测、载人飞船遥测、货运飞船遥测、航天员生理数据、可变载荷试验数据等。这些数据的接口、格式、数据率、存储模式、控制粒度、下行优先级都有不同要求。如何自动灵活的切换遥测模式、适应这些多种类复杂数据的下行需求,也是组合体信息管理设计中的难题。

为解决上述问题,本文提出了一种主从式总线网络拓扑设计,采用一套专用对接 1553B 总线,将空间实验室和飞船子网从物理上完全隔离,提高故障情况下的冗余容错能力;并给出了相应的对接总线协议复用策略,可灵活支持不同飞船的信息传输需求。更适应于空间实验室与不同飞船多次组合和分离的需求。本文还给出了组合体遥测管理和模式快速切换的实现策略,以及对高、中、低速数据区分不同网络,进行多网络数据分级管理的方法,以实现组合体遥测和其他各类复杂数据流的复接下行。

1.1 网络拓扑设计

针对上述组合体信息管理需求,本文提出的主从式总线网络拓扑设计的基本框架如图 1 所示。空间实验室平台总线网络为主网,以核心数据处理设备为主控终端,以两套 1553B 串行数据总线连接各分系统终端,完成平台数据管理功能。空间实验室数管采用了交会对接专用的网关设备作为主控终端,以一套专用 1553B 对接总线连接载人飞船、货运飞船相关设备形成从网,完成交会对接数据交互的功能。对接总线上还配置了专用总线开关用于总线连接和断开的迅速切换。

组合体状态下,主网和从网协同完成组合体信息管理工

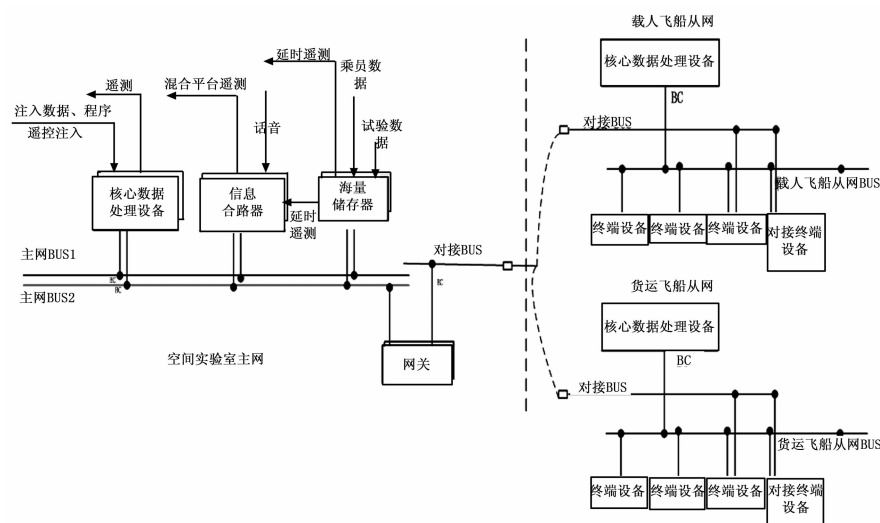


图 1 组合体网络拓扑图

作。在交会对接分离后,从网总线连接断开,主网独立完成空间实验室信息管理任务。

通过该网络拓扑设计,保证了空间实验室与载人/货运飞船双方信息流设计的独立性,能够支持交会对接过程船器的快速对接和撤离,同时在故障情况下确保船器双方各自平台信息管理功能不受影响。充分满足了空间实验室与载人/货运飞船交会对接的可靠性、灵活性、实时性的兼容要求。

1.2 对接总线协议复用设计

设计对接总线协议时,考虑到船器间手控指令和遥控转发的突发性和高实时、高可靠要求,以及货运飞船、载人飞船不同数据类型和数据流量传输要求,采用了一种对接总线协议复用设计。主要策略如下:

1) 载人飞船和货运飞船连接到对接总线的终端设备复用对接总线的同一 RT 地址。

2) 飞船到空间实验室数据传输为载人飞船/货运飞船方发起,通过设置服务请求方式进行。实际前后两次服务请求设置的间隔时间由载人飞船/货运飞船确定,空间实验室数管不对发送周期进行检查,定期查询到服务请求后就发起数据采集。这样实际数据传输速率由载人飞船/货运飞船方控制,可适应不同飞船的数据传输速率差异。

3) 空间实验室网关向载人飞船货运飞船方发送数据时,不论数据长度是否大于 64 字节,都发送勤务指令。载人飞船/货运飞船方先刷新子地址数据,再设置服务请求编码。每次设置完服务请求,先收到所设子地址的勤务指令后(即空间实验室网关已将数据读完),再次刷新子地址数据,并再次设置新的服务请求。这样通信收发双方完成了一次握手,保证了数据既不会丢失,也不会重复。以此满足对接数据或控制指令传输的高可靠要求。

4) 载人飞船/货运飞船需传输的遥测格式不一致,为了使系统能够适应不同飞船数据的变化,由飞船将数据封装为 AOS (Advanced Orbiting System 高级在轨系统) 标准^[8]的 MPDU (多路复用数据单元) 格式,在 MPDU 中实现包一级的调度,可按照需求传输不同种类的数据包。对于空间实验室而言,无需关心包一级的内容,只需将固定长度的 MPDU 采集并透明传输即可,如此可兼容不同飞船的遥测格式差异。

5) 空间实验室到载人飞船的仪表显示参数和到货运飞船的操作控制信息、载人飞船到空间实验室的手控指令和货运飞船到空间实验室的操作控制信息、载人/货运飞船发到空间实验室的遥测数据、空间实验室到载人/货运飞船的遥控转发数据都属于不同信息流,但复用同一子地址。这样空间实验室网关不需了解当前是与哪种飞船对接,也不需进行工作模式切换,只需在核心数据处理设备的驱动下完成各种数据流的转发,提高了网关设计的灵活性和可靠性。

通过对接总线协议的复用设计,有效实现了组合体状态下货运飞船、载人飞船不同类型和流量数据的可靠传输。

1.3 遥测管理实现策略

本文给出的组合体遥测管理方法选用了 AOS 提供的 8 种业务中的 3 种: E—PDU 业

务、多路复用数据单元 (M—PDU) 业务、虚拟信道数据单元 (VCDU) 业务^[9]。物理信道有 2 个主信道：信道合路器输出 768 Kbps 信道和海量存储器输出 20 Mbps 信道。

信道合路器输出 768 Kbps 信道设置 6 种虚拟信道，具体见表 1。

表 1 信道合路器输出的虚拟信道表

| 虚拟信道 | 数据 |
|------|-----------------|
| VC1 | 空间实验室实时遥测 |
| VC2 | 压缩后的空间实验室平台延时遥测 |
| VC3 | 载人飞船或货运飞船的实时遥测 |
| VC4 | 载人飞船或货运飞船的延时遥测 |
| VC5 | 语音数据填充 |

填充数据海量存储器输出 20 Mbps 信道设置 5 种虚拟信道，具体见表 2。

表 2 海量存储器输出的虚拟信道表

| 虚拟信道 | 数据 |
|------|----------------|
| VC6 | 航天员相关数据 |
| VC7 | 空间实验室延时遥测 |
| VC8 | 载人飞船或货运飞船的延时遥测 |
| VC32 | 载荷试验数据 |
| 填充 | 填充数据 |

具体的遥测管理实现策略如下：

独立运行时，空间实验室核心数据处理设备先将自身的内部参数与总线采集来的各分系统终端遥测数据，分别包装成 E—PDU 并组成 M—PDU，入境时通过总线将实时遥测数据输出给信道合路器；出境时将延时遥测 M—PDU 送海量存储器中存储，入境后发送给信道合路器，由信道合路器负责组织将数据生成 VCDU 和信道存储数据单元 (CADU) 输出。

组合体运行时，载人飞船/货运飞船 CTU 切换遥测模式，将组织好的遥测 M—PDU 通过对接总线送给空间实验室网关；空间实验室 CTU 也同时切换遥测模式。在测控区内，将网关收到的飞船遥测转发到信道合路器。信道合路器将飞船遥测生成 VCDU 和信道存储数据单元 (CADU)，再与空间实验室自身遥测及其他平台数据 CADU 共同混合复接，完成船器子网遥测合路下行；在测控区外，将网关收到的飞船遥测转发到海量存储器。海量存储器将飞船遥测生成 VCDU，再与空间实验室自身遥测 VCDU 共同存储，在入常规测站时将船器延时遥测发

送至信道合路器合路下行，在入中继测站时与其他载荷、乘员数据合路发到测控设备下行。

本文提出的遥测管理实现策略根据飞行阶段、关键事件及其组合条件切换遥测模式，适用于独立运行和载人飞船组合体、货运飞船组合体等不同阶段的遥测需求。

1.4 多网络数据分级管理

交会对接组合体状态下空间实验室数管需完成自身主网和载人飞船/货运飞船从网的互联、以及高中低速数据的混合复接和多路下行。组合体各设备产生的数据种类多、变化大、传输率差异也很大。

空间实验室应用了高、中、低速三种类型网络，用于分别传输这些种类繁多的：1394^[10] 和 LVDS 总线构成高速网络，用于传输各类可变试验载荷设备的实验数据，最大带宽 100 Mbps；中速网络包含船器共 4 套 1553B 总线，用于传输船器平台设备遥测及其他中速数据，设计最大数据处理能力 800 kbps；低速网络采用 422 接口、模拟量接口、数字量接口等，用于传输语音数据、离散的温度量和模拟量数据、长度较短的数字量数据等。

本文提出的多网络数据分级管理方法对于上述数据的管理分成两级：第一级是核心数据处理设备，通过 AOS 的包装业务和多路复用业务，完成中低速网络和飞船从网数据的调度和合路；第二级包含信道合路器和海量存储器。两者均采用了 AOS 的虚拟信道数据单元业务。信道合路器完成了中速网络数据的复接；海量存储器完成中高速网络数据的存储和复接。具体组合体状态下信息分级管理如图 2 所示。

第一级核心数据处理设备通过中低速网络采集各类遥测数据后，首先组织遥测源包，再计算遥测源包的数据量，动态地将待发送的遥测源包平均分配到两条 1553B 总线网络发送到第二级的信道合路器或海量存储器，防止由于数据量过大导致

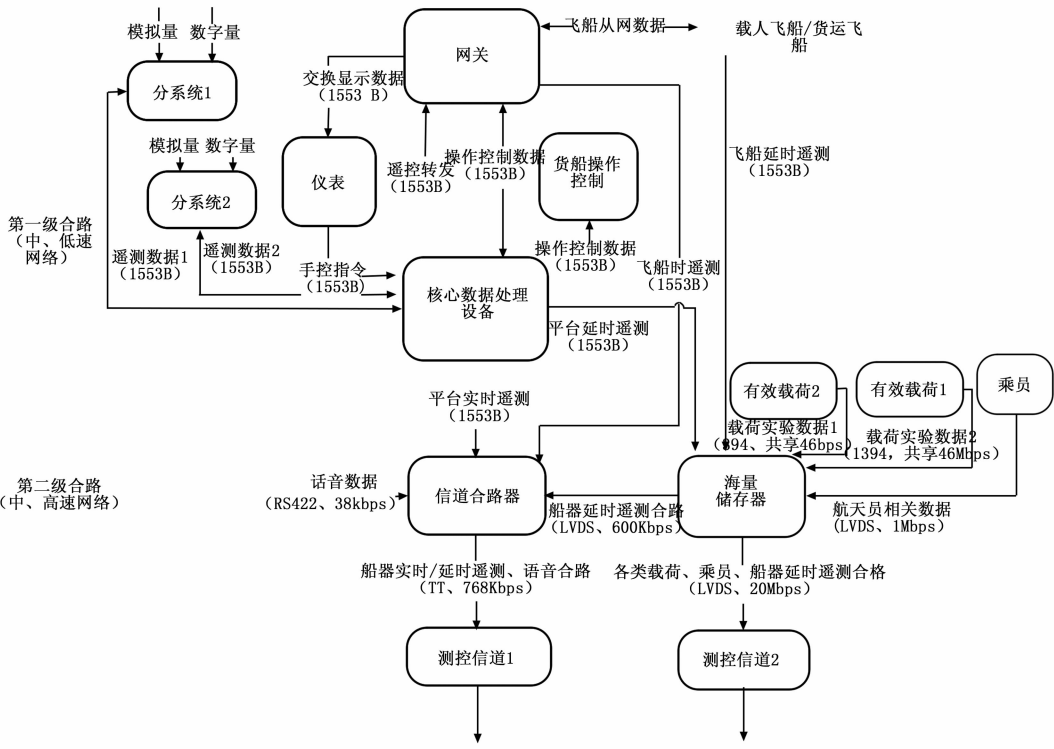


图 2 组合体分级管理信息流图

其中一条总线过载。并且根据源包的重要性程度不同,地面向CTU注入指令使能和禁止系统内的部分源包,动态调节总线通信的数据流量,均衡总线负载。核心数据处理设备将调度后的源包组织成MPDU再发往第二级合路。

第二级的信道合路器完成空间实验室遥测、飞船遥测、话音的复接合路。在测控区内,高速数据复接器接收船器实时遥测、话音和海量存储器发来的船器延时遥测,为不同类型的数据分配多个虚拟信道,将多个虚拟信道复接发往测控设备下行。

第二级的海量存储器在测控区外将船器延时遥测、乘员数据、各类可变高速载荷数据进行分区存储,在测控区内海量存储器将这些不同分区以固定优先级依次回放:船器延时遥测>乘员数据>载荷数据,并将回放数据分配多个虚拟信道再复接合路,发往测控设备下行。

该分级管理方法更能适应多数据源的复杂信息管理需要,复接数据种类更多,速率更加多样化,系统的灵活性、可扩展能力更强,满足了组合体不同用户的需求。

2 系统试验验证

支持多种飞船交会对接的多网络数据分级管理方法已经应用于空间实验室数管分系统,首先在分系统测试期间,对该方法的正确性和可靠性进行了试验验证。空间实验室数管分系统进行了连续100小时的模拟飞行。期间通过载人飞船、货运飞船的数据流模拟软件分别模拟与不同飞船的反复对接和分离,并通过软件调整对接总线数据传输速率。通过试验发现,应用该数据分级管理方法后,空间实验室可以支持与载人飞船、货运飞船的任意次数交会对接,可迅速实现独立运行和组合体遥测模式切换,当对接总线传输速率从28 Kbps至36 Kbps变化时,总线上各类数据传输均正确、可靠。

该方法还通过了空间实验室与载人飞船和货运飞船在轨飞行实验,验证了与载人飞船和货运飞船共四次交会对接组合体状态下的不同信息管理功能。空间实验室至今已在轨运行超过一年,组合体状态下运行时间超过两个月。通过该方法实现了共4条1553B总线的管理,空间实验室、载人船/货运船3条总线每条流量均大于200 Kbps。与载人船对接时,对接总

(上接第193页)

- [3] 刘晓娟,周新力,侯松高. 电波传播抛物方程模型在航空通信中的应用[J]. 电讯技术, 2016, 56(6): 624-628.
- [4] 程芳,沈怀荣. 不均匀大气结构中的电磁环境仿真研究系[J]. 统仿真学报, 2012, 24(10): 2209-2214.
- [5] 刘广东. 基于帕德近似法模拟一般色散媒质电波传播的ADE-FDTD-CPML统一实现方案[J]. 电子学报, 2015, 43(7): 1382-1387.
- [6] 卢厚清,宋歌,陈亮,等. 基于射线跟踪法的微蜂窝电波传播预测模型[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(3): 281-285.
- [7] 翁干飞,华祖耀,田新华. 电磁环境仿真研究[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 107-110.
- [8] 刘勇,周新力,金慧琴. 电波传播预测模型分析与研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(7): 84-86.
- [9] 张鑫,杨明华. 基于城郊环境下Okumura-Hata预测模型的校正与实现[J]. 通信技术, 2008, 41(5): 67-68, 78.
- [10] 张明高. ITU-R建议中几项电波传播技术模式[J]. 中国工程科学, 2000, 2(7): 74-78.

线流量31 Kbps;与货运船对接时,对接总线流量32 Kbps。乘员及各类载荷数据流平均流量为20 Mbps,瞬时最大速率为44 Mbps。各类高、中、低速数据均可正常复接下行。

3 结论

多航天器的组合体信息管理是未来航天领域发展的重要方向。本文提出的支持多种飞船交会对接的数据分级管理方法,可支持同一目标航天器与不同种类航天器可靠对接,并执行不同组合体信息管理功能。该方法已经在空间实验室数管中应用,并在空间实验室与载人飞船和货运飞船的交会对接任务中完成了在轨飞行验证。该方法还可作为载人航天领域后续的空间站等大规模航天器组合体信息管理的技术基础。

参考文献:

- [1] 何宇,杨宏,白明生. 空间实验室技术综述及发展战略[J]. 载人航天, 2009, 15(3).
- [2] 张柏楠,戚发轫. 中国载人航天技术的历史性跨越[J]. 航天器工程, 2008, 17(5): 1-6.
- [3] 林来兴. 空间交会对接技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- [4] 谭维织,顾莹琦. 空间数据系统[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2004.
- [5] 王菁. 载人飞船交会对接及组合体模式下的数据管理[J]. 航天器工程, 2012, 21(4).
- [6] 兰天,高建军,王菁. 神舟飞船交会对接信息流可靠性设计[J]. 航天器工程, 2011, 20(6).
- [7] 周林. 国际空间站信息系统方案[J]. 遥测遥控, 2005, 26(2): 50-56.
- [8] Consultative Committee for space Data System. AOS space data link protocol[S]. CCSDS 732.0-B-2. Recommended Standard, Issue 2. Washington, DC, USA: CCSDS, 2006.
- [9] 田庄,张庆君. 载人航天器AOS虚拟信道调度策略研究[J]. 航天器工程, 2006, 15(2): 20-22.
- [10] IEEE Std 1394a, IEEE standard for a high performance serial bus - amendment[S]. 2000.
- [11] Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(3): 317-325.
- [12] Whitteker J H. Measurements of path loss at 910 MHz for proposed microcell urban mobile systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1988, 37(3): 125-129.
- [13] 李伟,杨森,戴慧玲. 热带无线电波传播研究进展及核心影响因素分析[J]. 电讯技术, 2014, 54(9): 1314-1320.
- [14] Xia H H, Kim S, Bertoni H L. Microcellular propagation measurements in Dallas city[A]. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. 1993, 593-597.
- [15] Piazzzi L, Liang G, Bertoni H L, et al. Comparison of measurement based and site specific ray based microcellular path loss predictions[A]. IEEE International Conference on Universal Personal Communications[C]. 1996, 2: 656-660.
- [16] 费伟. 基于ITU-R P. 1546模型的监测站覆盖影响因素分析[J]. 数字通信世界, 2016(6): 50-52.
- [17] 张文波,曹耀钦. 电磁环境仿真中电波传播模型研究及仿真分析[J]. 电波科学学报, 2012(6): 27(3): 537-542.