

一种智能变电站的多规约通信映射方法

李国号¹, 胡春潮², 洪毅文¹, 刘冲³

(1. 广东电网有限责任公司中山供电局, 广东 中山 528400; 2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州 510000;
3. 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421000)

摘要: 目前大多数变电站的通信基于 IEC 61850 标准, 但其性能落后于现代通信技术, 阻碍了变电站向智能轻量级通信的全面过渡。为此, 提出一种通信映射方法, 结合简明二进制对象表示 (CBOR) 格式, 将 IEC 61850 标准映射到受限应用程序协议 (CoAP)。首先, 给出常用 IEC 61850 服务的 CoAP 映射 URI 和请求方法; 其次, 对 CoAP 订阅模式进行扩展, 以解决 IEC 61850 到 CoAP 映射需求; 最后, 搭建通信映射模型验证所提出方法的有效性。与现有的 WS-SOAP、HTTP 映射方案相比, CoAP+CBOR 只需要 44%、18% 的信息大小以及 71%、85% 的通信时间, 可以缓解电网中设备和网络资源受限的问题。

关键词: 智能变电站; 映射; IEC 61850

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.019 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)02-0168-11

A multi-protocol communication mapping method for intelligent substation

LI Guohao¹, HU Chunchao², HONG Yiwen¹, LIU Chong³

(1. Zhongshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhongshan 528400; 2. Energy Technology Co., Ltd. of Guangdong Electric Power Academy, Guangzhou 510000; 3. School of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421000)

Abstract: At present, the communication of most substations is based on the IEC 61850 standard, but its performance is lagging behind modern communication technology, which hinders the comprehensive transition of the substation to intelligent lightweight communications. To this end, a communication mapping method is proposed, which combines the confident binary object representation (CBOR) format and maps the IEC 61850 standard to the constrained application protocol (CoAP). Firstly, a COAP mapping URI and request method of commonly used IEC 61850 services are given. Secondly, the COAP subscription mode is expanded to resolve the IEC 61850 to COAP mapping requirements. Finally, the communication mapping model is set to verify the effectiveness of the proposed method. Compared to existing WS-SOAP and HTTP mapping schemes, COAP+CBOR requires only 44% and 18% of information size, 71% and 85% communication time, which alleviates the problem of limited equipment and network resources in the power grid.

Key words: intelligent substation; mapping; IEC 61850

IEC 61850 是最初设计用于对变电站自动化系统进行建模、控制和监测的标准, 现已扩展到支持

如风力发电厂、水力发电站和分布式能源等新的电力系统领域^[1-3]。该标准定义了数据模型、报告方

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-31

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目 (032000KK52180063)

通信作者: 李国号 (1974—), 男, 高级工程师, 主要从事电网自动化研究; E-mail: 3634592767@qq.com

案、事件、设置、样本数据传输以及命令和数据存储,使得变电站设备能够正常运行。

IEC 标准规范定义通信模型包括映射:制造报文规范(manufacturing message specification, MMS)^[4]、串行通信^[5]和 ISO/IEC 8802-3 以太网^[6]。除此之外,研究学者还提出了在智能电网自动化系统内进行通信的其他方式,如通用对象代理体系结构(common object request broker architecture, CORBA)、超文本传输协议(hyper text transfer protocol, HTTP)一表述性状态传递(representational rtate transfer, REST)等^[7-8]。由于超文本传输协议基于文本的特性,使用可扩展通讯和表示协议(extensible messageing and presence protocol, XMPP)的复杂性,以及基于冗长的可扩展标记语言(extensible markup language, XML),导致网络上的通信争用造成较大通信开销。

随着智能设备在变电站中的应用,为了降低 CPU、RAM 和能耗,研究学者为资源受限的设备定义了新的轻量级网络协议^[9]。虽然变电站的能耗不是首要问题,但如果设备需求量大,部署设备的运行成本可能会很高。因此,更便宜且受限的智能设备需要采用轻量级通信方法^[10]。在现有的研究中,已经提出了不同的轻量级协议来映射 IEC 61850 标准^[11-13],最广泛使用的轻量级协议是受限应用协议(constrained application protocol, CoAP)和消息队列遥测传输协议(message queuing telemetry transport, MQTT)。由于 MQTT 设计时间较早,应用相对成熟,然而对于环境控制,CoAP 的客户端一服务器模型比 MQTT 的发布一订阅模型适应性更强。此外, MQTT 需要一个代理来控制不同设备之间的通信,这会增大通信开销。因此,在变电站环境中使用 CoAP 是一个更好的选择。文献[14]首次将 IEC 61850 标准映射至 CoAP,然而,研究中只映射了一组不完整函数,并且没有遵循 RESTful 方法,对 PUT 和 GET 请求需使用不同的资源;文献[15]分析了 CoAP 的订阅扩展的可能性,分析结果可以增强 CoAP 通知,但对订阅机制的增强是有限的。

上述文献都侧重于减少通知递送的数量,或在可能的情况下聚合或跳过通知。然而 IEC 61850 到 CoAP 的映射具有以下需求:使用 PUT/POST 订

阅;请求上可不包含资源具体表示;可通过关联资源订阅。目前暂无相关研究可全部满足 IEC 61850 标准映射至 CoAP 的实际需求。在对比 IEC 61850 对不同通信协议的映射方法后,本文提出一种新的 IEC 61850 标准服务于 CoAP 的映射方法,并将资源表示格式改为简明二进制对象表示(concise binary object representation, CBOR),完成与 CoAP+CBOR 的完整网络堆栈集成,并对 CoAP 订阅机制进行扩展。这个扩展的订阅机制满足了映射需求,且所提出的通信体系结构可以应对轻量级响应问题,同时保持与后端的互操作性。

1 通信规约

1.1 IEC 61850 标准

IEC 61850 是 IEC 电力系统体系的一部分,最初的设计目的是为变电站的建模、控制和监测提供标准化参考。IEC 61850 的基本信息模型如图 1 所示,其中服务器(server)将 IED 连接到外部,由一组逻辑设备组成。逻辑设备(LD)为真实设备的虚拟表示,由一组逻辑节点(LN)组成;LN 为每个应用程序功能的虚拟抽象,所有 LD 包括一个零逻辑节点(LLN0),代表逻辑设备的公共数据;数据(data)是与 LN 相关的真实世界信息的表示。数据属性(data attributes)为数据实例的类型化信息,如数值、时间戳;数据集(dataset)为 LD 中包含的一组现有数据属性。

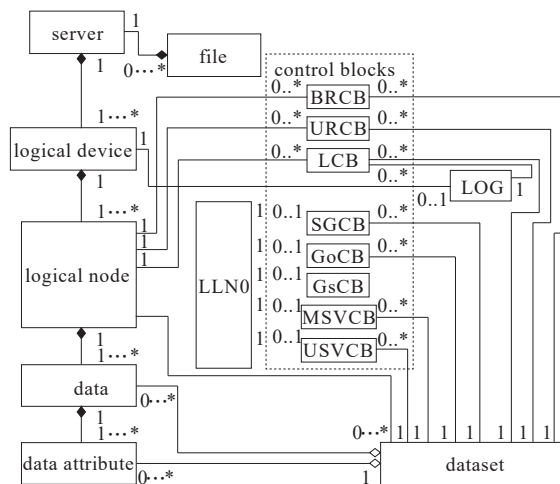


图 1 IEC 61850 标准的基本信息模型

Figure 1 Basic information model of IEC 61850 standard

IEC 61850定义了控制块(CB),即用于配置和管理一组与信息模型相关的附加功能的专用类。

1) 报告(reporting):定义生成信息数据集中的数据属性报告的条件,包含缓冲报告控制块(BRCP)和无缓冲报告控制块(URCB)2种类型。

2) 日志(logging):日志控制块(LCB)配置要记录的分组数据属性以及该日志记录的条件。

3) 配置(configuration):配置组控制块(SGCB)定义配置组或在不同组之间切换。

4) 事件(eventing):基于发布—订阅机制,管理设备中生成事件的传递,包含①由GOOSE控制块(GOCB)管理的面向对象的一般变电站事件(GOOSE),以支持数据属性组在数据集中的传递;②由GSSE控制块(GSCB)管理的一般变电站状态事件(GSSE),用于提供基本状态更改信息。

5) 采样值(sampled values):以时间控制的方式管理采样信息的传输,可以通过2种方式实现,即使用多播采样值控制块(MSVCB)的多播通信或使用单播样本值控制块(USCVB)的单播通信。

所有的CB都包含在LNS中,采用一个名称和一个绝对引用进行标识,该标识能够在整个模型中唯一地指向CB。

1.2 CoAP+CBOR 协议

CoAP是一种可用于客户端—服务器通信中的REST交互的通信协议。CoAP定义了HTTP请求方法的子集,即GET、POST、PUT和DELETE。通过这些请求方法,CoAP能够对资源执行基本的创建、读取、更新和删除功能;GET用于检索资源表示,且不会修改资源;POST用于根据传输的资源表示创建新资源或更新现有资源;PUT用于更新资源,并且是幂等的。

HTTP和CoAP之间的一个主要区别是后者在用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)而不是传输控制协议(transmission control protocol, TCP)之上运行。对于响应代码,CoAP既使用HTTP代码的子集,也使用专门为CoAP定义的新代码。在没有安全性的情况下运行时,CoAP使用5683端口,如果在DTLS之上,则使用5684端口。资源可以用URI寻址,URI也可以包含查询。

与TCP相反,UDP不能保证数据包传递和排

序的可靠性,因此,CoAP在应用层使用可确认(CON)和不可确认(Non)消息机制,前者需要确认,后者使用即发即忘方法。CoAP的另一个重要特性是它的扩展性,此特性允许使用通知推送,从而产生发布/订阅通信模式。客户端可通过发送扩展的GET请求,并激活观察选项,服务器随后将客户端添加到该资源的订阅户列表中,并使其随时了解资源的更改。

CBOR在RFC 7049中的定义是一种二进制序列化数据格式,其目标是用较小的代码占用空间、较小的消息大小和可扩展性进行编码,这使得CBOR非常适合智能电网环境。在文献[17]中比较了智能电网环境中的几种数据表示格式,并得出CBOR表示数据比JSON和XML需要更少字节的结论。本文使用CBOR来减少IEC 61850映射到CoAP传输的消息开销。

2 方案设计

2.1 IEC 61850到CoAP的映射

抽象通信服务与信息模型的每个抽象类相关联,7类IEC 61850服务于CoAP的映射方法如下。

1) 基本服务。

①服务器类(server):GetServerDirectory以所有LD或文件的名称列表进行响应。若要映射此函数,则需2个不同的URI,一个用于请求LD,另一个用于文件。

②逻辑设备类(logical devices):GetLogicalDeviceDirectory用于检索引用LD的所有可见逻辑节点的列表。

③逻辑节点类(logical node):GetLogicalNodeDirectory检索逻辑节点的对象列表。GetDataValues检索逻辑节点可见的所有数据的属性,在其中添加查询并允许根据数据的函数约束(FC)过滤数据。

④数据类(data):GetDataValues读取完整数据或其中一部分;SetDataValues设置数据;GetDataDirectory检索可见的逻辑节点被引用数据的属性名的列表;GetDataDefinition使客户端能够获得逻辑节点可见数据定义的列表。

⑤数据集类(dataset):GetDataSetValues返回

可访问的引用数据属性值;SetDataSetValues 用来设置被引用的数据集属性值;CreateDataSet 允许客户端创建一个数据集,其中的成员列表由可访问的功能约束数据(FCD)或功能约束数据属性(FCDA)定义;DeleteDataSet 允许客户端请求服务器删除数据集。为了映射这些服务,可以为 GetDataSetDirectory 服务增加一个新级别的 URI,并使用数据集的基本

URI 来读取、删除和更新。服务于 CoAP URI 的映射方法如表 1 所示。

2) IEC 61850 标准定义了 68 项服务,已实现 CoAP 映射的服务如表 2~7 所示,给出了 IEC 61850 函数的名称、映射的 URI 和 CoAP 请求方法以及标识符。已经实现的服务包括:报告、日志、设置、事件、采样值传输以及附加服务。

表 1 基本服务 CoAP 映射

Table 1 Mapping of basic services to CoAP

基本服务	函数	URI	方法
server	GetServerDirectory	coap://{host}/LDs	GET
	GetServerDirectory	coap://{host}/Files	GET
logical device	GetLogicalDeviceDirectory	coap://{host}/LDs/{LD}	GET
logical node	GetLogicalNodeDirectory	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/{ACSIClass}	GET
	GetAllDataValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/AllValues[? FC={fc}]	GET
data	GetDataValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Dats/{Data}	GET
	SetDataValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Dats/{Data}	PUT
	GetDataDirectory	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Dats/{Data}/Directory	GET
	GetDataDefinition	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Dats/{Data}/Definition	GET
dataset	GetDataSetValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Datsets/{Dataset}	GET
	SetDataSetValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Datsets/{Dataset}	PUT
	CreateDataSet	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Datsets	POST
	DeleteDataSet	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Datsets/{Dataset}	DELETE
	GetDataSetDirectory	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/Datsets/{Dataset}/Directory	PUT

表 2 报告服务 CoAP 映射

Table 2 Mapping of reporting services to CoAP

报告服务	函数	URI	方法
BRCB	Report	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/BRCBs/{BRCB}/Reports	notification
	GetBRCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/BRCBs/{BRCB}	GET
	SetBRCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/BRCBs/{BRCB}	PUT
	if enable	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/BRCBs/{BRCB}/Reports	GET+Obs.
URCB	Report	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/URCBs/{URCB}/Report	notification
	GetURCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/URCBs/{URCB}	GET
	SetURCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/URCBs/{URCB}	PUT
	if enable	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/URCBs/{URCB}/Report	GET+Obs.

表 3 日志服务 CoAP 映射

Table 3 Mapping of logging services to CoAP

日志服务	函数	URI	方法
LCB	GetLCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/LCBs/{LCB}	GET
	SetLCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/{LN}/LCBs/{LCB}	PUT
log	QueryLogByTime	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/LOG[? tstart={tstart}][&][? tstop={tstop}]	GET
	QueryLogAfter	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/LOG[? tstart={tstart}][&][? entry={entryid}]	GET
	GetLogStatusValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/LOG/Status	GET

表 4 设置服务 CoAP 映射

Table 4 Mapping of setting services to CoAP

设置服务函数	URI	方法
SelectActiveSG	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/SGCB? action=active	PUT
SelectEditSG	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/SGCB? action=edit	PUT
SetSGValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/SGCB	PUT
ConfirmEditSGValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/SGCB? action=confirm	PUT
GetSGValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/SGCB? buffer=[active/edit]	PUT
GetSGCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/SGCB/Status	GET

表 5 事件服务 CoAP 映射

Table 5 Mapping of event services to CoAP

事件服务	函数	URI	方法
GOCB	SendGOOSEMessage	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GoCB/{event}	notification
	GetGoReference	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GoCB? offset={n}	GET
	GetGOOSEElementNumber	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GoCB? ref={ref}	GET
	GetGoCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GoCB	GET
	SetGoCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GoCB	PUT
	if enable	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GoCB/{event}	GET+Obs.
GSCB	SendGSSEMessage	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GsCB/{event}	notification
	GetGsReference	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GsCB? offset={n}	GET
	GetGSSEDataOffset	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GsCB? label={label}	GET
	GetGsCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GsCB	GET
	SetGsCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GsCB	PUT
	if enable	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/GsCB/{event}	GET+Obs.

表 6 采样值传输服务 CoAP 映射

Table 6 Mapping of sample value transmission services to CoAP

采样值传输服务	函数	URI	方法
unicast	SendUSVMessage	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/USVCBs/{USVCB}	notification
	GetUSVCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/USVCBs/{USVCB}	GET
	SetUSVCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/USVCBs/{USVCB}	PUT
	if enable	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/USVCBs/{USVCB}	GET+Obs.
multicast	SendMSVMessage	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/MSVCBs/{MSVCB}	notification
	GetMSVCBValues	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/MSVCBs/{MSVCB}	GET
	SetMSVCBValue	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/MSVCBs/{MSVCB}	PUT
	if enable	coap://{host}/LDs/{LD}/LLNO/MSVCBs/{MSVCB}	GET+Obs.

表 7 附加服务 CoAP 映射

Table 7 Mapping of additional services to CoAP

附加服务	函数	URI	方法
access control	Associate	coap://{host}/Associations	POST
	Abort	coap://{host}/Associations/{AssId}? action=abort	DELETE
	Release	coap://{host}/Associations/{AssId}? action=release	DELETE
file transfer	GetFile	coap://{host}/Files/{File}	GET
	SetFile	coap://{host}/Files/{File}	POST
	DeleteFile	coap://{host}/Files/{File}	DELETE
	GetFileAttributeValues	coap://{host}/Files/{File}/Status	GET

2.2 CoAP 订阅扩展

首先制定减少通信开销和延迟的具体需求,然后提出 CoAP 订阅扩展解决方案。

需求 1 使用 PUT/POST 订阅。客户端只能使用带有当前订阅扩展名的 GET 请求进行订阅。若要实现这一需求,则需允许客户端在单个步骤中创建或更新资源并订阅。

需求 2 无具体资源表示的响应。在某些使用案例中,客户端可能希望从低带宽数据连接中获取通知,但在订阅时可能不需要当前资源具体表示。如果资源很大,则此响应可能也会很大。

需求 3 通过关联资源订阅。客户端可能希望更新、创建或读取配置资源,并订阅与其相关的资源。而使用 CoAP 当前订阅机制,客户端将需要发送多个独立的请求。

为了解决这些需求,创建 2 个新的选项和 4 个新的响应代码,分别如图 2、3 所示。

No	C	U	N	R	Name	Format	Length	Default
24					No-payload	empty	0	(none)
43	x	x	-	x	Observe-uri	string	0-255	(none)

图 2 所提出的 CoAP 新选项

Figure 2 The proposed new options for CoAP

Code	Description
2.10	Subscribed
2.11	Created and Subscribed
2.14	Changed and Subscribed
2.15	Content and Subscribed

图 3 所提出的 CoAP 新响应代码

Figure 3 The proposed new response codes for CoAP

2 个新选项为 No-payload 和 Observe-uri,前者向服务器表明客户端此刻对接收资源不感兴趣,而后者则表明客户端想要订阅相关资源的通知;新响应代码允许服务器指示客户端订阅已成功,但它不包括资源的具体表达,因为客户端请求不接收它。这些新的 CoAP 选项和响应代码可以解决所提出的需求,并在订阅资源时减少开销和消息数量。订阅扩展解决过程如下。

1) 使用 PUT/POST 订阅。

目前客户端只能使用 GET 请求进行订阅,不能使用 PUT 或 POST。对 PUT 或 POST 请求使用 Observe 选项,模仿 GET 请求,其中服务器以 2.01

Created 或 2.04 Changed 代码和 Observe 选项进行响应,这样,客户端就可以在订阅通知的同时创建或更新资源,响应后通知的工作方式与当前方式相同。使用 PUT 更新资源的值,订阅资源并获取通知,如图 4 所示。

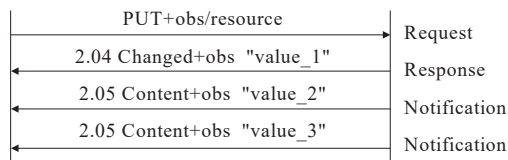


图 4 更新资源的值、订阅资源并获取通知

Figure 4 Update the values of a resource, subscribe to it and get notifications

2) 无具体资源表示响应。

通过 no-payload 选项,客户端可以让服务器知道订阅时不需要资源表示,若服务器不能识别该选项,则将发送整个资源表示;当包含 no-payload 选项时,observe 选项也必须出现在请求中。为了处理响应,添加图 3 所示的 4 个代码,这些响应表明客户端已成功订阅,但响应未带有资源表示。一个交互显示如图 5 所示,使用 GET 请求订阅资源但不接收当前资源表达,带有 observe 和 no-payload 选项。正确的交互响应是 2.10 Subscribed,而如果订阅失败,则响应是 5.00 Internal Server Error 或 5.03 Service Unavailable。

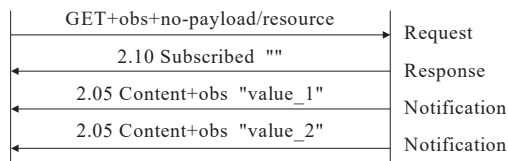


图 5 未获取当前状态和通知的情况下订阅资源

Figure 5 Subscription to a resource without getting the current state and notifications

3) 通过关联资源订阅。

当资源具有另一相关资源时,客户端可能想要订阅其中之一,同时向另一资源发送请求。使用 observer-uri 选项可以在订阅主资源的同时读取、更新或创建资源。订阅不同的资源并获取资源的表示形式和通知如图 6 所示,2.15 Content and Subscribed 响应为请求到的资源表示以及客户端将订阅相关的资源。如果无法处理订阅请求,则响应代码回落到 2.05 Content;对于其他问题,通常使用错误代码。但是,当客户端想要订阅的资源不存在

时,正确的响应代码是4.02 Bad-Option,响应应该包括 observer-uri 选项。

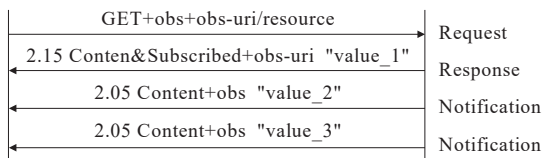


图6 订阅不同的资源并获取资源的表示形式和通知

Figure 6 Subscribe to different resources and get the representation and notifications of the resources

Observe-uri 选项和 No-payload 选项也可以一起使用。没有获得表示的情况下轮询资源,订阅不同的资源并获取通知如图7所示,客户端可以发送请求到一个资源并订阅其相关的资源。如果可以正确处理请求,服务器将响应 2.10 Subscribed;对于一般错误,使用常规错误码。如果相关的 uri 不存在,则使用 4.02 Bad-Option 和 observer-uri 选项;如果客户端无法订阅,则使用 5.00 Internal Server Error 或 5.03 Service Unavailable。

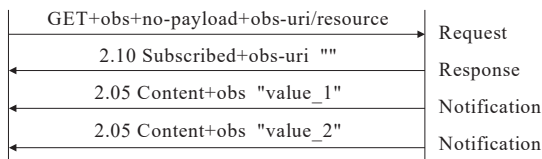


图7 没有获得表示的情况下轮询资源、订阅不同的资源并获取通知

Figure 7 Poll a resource without getting the representation, subscribe to a different resource and get notifications

如果客户端希望通过 PUT 或 POST 请求创建或更新资源,类似于 GET,服务器将响应 2.11 Created and Subscribed 或 2.14 Changed and Subscribed,并提供 Observe-uri 选项,但不携带有效资源表达。成功订阅已存在资源的 PUT 请求如图8所示。如果无法订阅,服务器将使用 2.01 Created 或 2.04 Changed。与 GET 请求一样,如果 observe-uri 选项中的资源不存在,服务器将响应 4.02 Bad option 和 observe-uri 选项。图4~8表明:所描述的新选项和响应代码只在订阅机制中起作用,通知是按照当前机制传递的。

遵循 RFC 7252 规则,将代码号 24 表示 No-payload, 43 表示 Observe-uri。如果忽略 No-payload,服务器则可以处理发送携带资源具体表示的请求,该选项仅指示客户端是否需要带资源

表示进行响应,它没有长度和格式;Observe-uri 与 uri-path 平行,表示客户端想订阅的某个资源,与 uri-path 选项类似,以字符串格式表示,最大长度为 255。订阅 observe-uri 资源条件之一是该资源必须是可以被观察的。

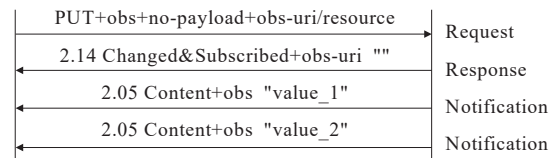


图8 未获得表示的情况下更新资源、订阅其他资源并获取通知

Figure 8 Update a resource without getting the representation, subscribe to a different resource and get notifications

3 方案实现

为了评估所提出的映射方法,使用文献[17]中开发并首次引入的软件工具,该工具可以图形化地创建兼容 IEC 61850 的数据模型。给定信息后该工具可生成通信协议的源代码,此源代码将数据模型与用户选择的通信堆栈集成在一起,并适配 IEC 61850 的服务模型。HTTP 映射使用 JSON 作为数据的表示格式,而 WS-SOAP 使用 XML;本文映射方法使用 CBOR 进行数据表示。

本文将文 2 所述的 CoAP 选项(在 SetBRCB Values 和 SetURCBValues 函数中)添加到系统中,如表 8 所示。客户端在更新 BRCB 或 URCB 时,想要订阅带有 CoAP 当前规范的选项和响应码的报表时,需要先更新值,然后再发出订阅请求。有了新选项即可一步到位,但是,若客户端只想更新值而不是订阅报告,则请求与传统方案相同。因此,所提出的方案支持以下需求:在 no-payload 选项的情况下订阅报告,在生成报告之前不会请求;通过 RCB 资源订阅报表,而不是直接订阅;使用 PUT 请求在更新 RCB 资源时订阅。

IEC 61850 工具生成不同层次结构的代码,如图9所示,底层 lib-model-kernel 包含 IEC 61850 的核心功能,其上是 lib-model-specific,表示使用 Eclipse 插件工具创建的数据模型。用于本文方案验证的数据模型是一个变电站模型。用于为不同通信协

议创建服务器的库位于下一层,这些库都有自己的服务器辅助库(libcoap、microhttpd、gsoap++)和数据的表示格式(libcbor、jsoncpp);最后一层是生成的服务器,服务器集成了这些库。

在 HTTP 和 WS-SOAP 中,报告服务较为复杂,由于这些协议不允许推送通知,因此必须开发

和部署新的服务器和客户端。服务器将报表存储在系统的文件夹中;客户端监视这些文件夹以获取新报告,并在检测到新报告时向服务器请求新报告。由于使用了订阅扩展,CoAP 不存在类似问题,且此扩展使得同一个客户端可以订阅通知,并从生成报告的服务器请求推送通知。

表 8 使用当前的 COAP 规范和新的增强订阅机制更新并订阅报告

Table 8 Update and subscribe to reports using the current CoAP specification and new enhanced subscription mechanism

机制	函数	URI	方法
当前 CoAP	SetBRCBValues	coap://host/LDs/LDs/LN/BRCBs/BRCB	PUT
	Subscribe	coap://host/LDs/LDs/LN/BRCBs/BRCB/Reports	GET+Obs
	SetURCBValues	coap://host/LDs/LDs/LN/URCBs/URCB	PUT
	Subscribe	coap://host/LDs/LDs/LN/URCBs/URCB/Report	GET+Obs
增强订阅	SetBRCBValues	coap://host/LDs/LDs/LN/BRCBs/BRCB observe-uri: Reports	PUT+obs+no-payload+observe-uri
	SetURCBValues	coap://host/LDs/LDs/LN/URCBs/URCB observe-uri: Report	PUT+obs+no-payload+observe-uri

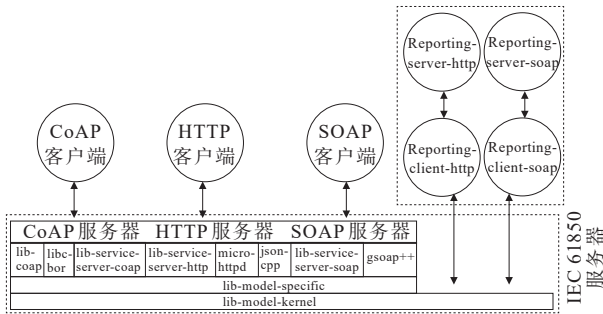


图 9 IEC 61850 工具生成的不同层次结构
Figure 9 Different hierarchical structures generated by IEC 61850 tool

4 方案评估

本文将评估所提出映射方法的性能,并将其与基于 WS-SOAP 和 HTTP 的系统进行比较。选择 2 个比较指标:①响应时间,即客户端从发送请求到接收到带有请求数据或确认响应的等待时间;②发送数据所需的字节数。对于通信所需字节的分析在受限的、低带宽的环境中尤其重要。

服务器使用开发板 Raspberry PI。Raspberry PI 主板已经用于工业环境中的原型机和实验室的测试,目前也正在扩展到真实的工业部署;客户端运行在 Windows10 PC 上,选择的 HTTP 客户端是

Postman 6.0.1,将 SoapUI 5.4.011 用于 WS-SOAP,并在 Copper 1.0.112 基础上将 Firefox 46.0 用于 CoAP。客户端通过 Wi-Fi 连接到服务器,客户端 PC 运行 Wireshark 来分析网络流量并测量通信开销和响应时间。

4.1 响应时间

首先根据响应时间评估不同方法的性能,为此,列出处理 500 个请求的通信响应时间最大值和中位数,如表 9 所示;然后如文 2 中所述,通过轮询服务器检查现有的报告并请求订阅。

在评估中,响应时间中位数通常比平均值更小,这是因为响应时间中位数未包含部分异常值。CoAP 响应时间中位值最低,大部分为 5~8 ms;CoAP 的响应时间是 HTTP 的 71% 和 WS-SOAP 的 85%。不同映射的响应时间中位数之比如图 10 所示,低于 100% 的值表示与 CoAP 相比其传输速度慢。CoAP 数据被用作基准(100%),HTTP 和 WS-SOAP 数据显示与基准相关:

$$p = \frac{C_{CoAP}}{P_{Protocol}} \times 100$$

式中, C_{CoAP} 为 CoAP 响应时间中位数; $P_{Protocol}$ 为其他 2 种协议响应时间中位数。

表9 响应时间数据

Table 9 The data of response time ms

测试编号	响应时间最大值			响应时间中位数		
	CoAP	HTTP	SOAP	CoAP	HTTP	SOAP
1	21.8	32.3	12.7	5.7	5.4	5.1
2	20.8	69.7	38.2	5.8	7.6	5.8
3	37.3	31.7	212.4	5.9	7.7	8.0
4	36.6	76.8	20.7	6.6	8.2	6.9
5	11.9	226.6	65.4	6.2	5.8	9.1
6	29.9	36.1	103.2	6.1	7.1	8.8
7	62.6	82.0	97.7	6.0	5.2	7.0
8	5 119.1	484.9	297.4	3 127.9	64.2	75.5
9	6 495.6	312.5	304.1	2 722.7	256.2	73.5
10	41.6	27.7	25.0	7.4	7.2	8.8
11	10.0	155.5	42.3	5.9	10.0	11.6
12	18.6	299.5	77.6	6.1	209.6	8.7
13	14.5	93.0	28.3	6.0	10.5	7.7
14	325.4	102.9	31.6	232.5	13.1	13.7
15	92.0	46.7	220.8	5.9	6.3	9.1
16	16.7	94.6	23.8	6.4	7.4	6.8
19	37.7	42.4	25.2	6.2	8.5	8.6
20	81.3	677.7	76.4	5.5	209.3	9.5
24	7.6	245.0	24.3	6.2	209.5	9.9
25	14.0	103.4	32.9	5.4	7.7	7.8
27	19.6	103.1	65.0	9.7	8.3	5.4
28	67.7	97.8	23.5	8.0	6.2	5.1
29	61.7	14.5	23.5	7.1	5.5	5.1
30	1 018.6	272.9	83.9	682.3	219.3	19.7
31	14.8	26.5	308.3	6.0	6.5	9.2
32	76.5	262.8	66.8	6.0	209.9	8.9
33	15.4	227.4	32.4	6.1	207.6	8.6
34	18.1	157.3	32.8	5.6	8.8	8.4
35	13.4	40.6	17.6	5.8	9.1	7.1

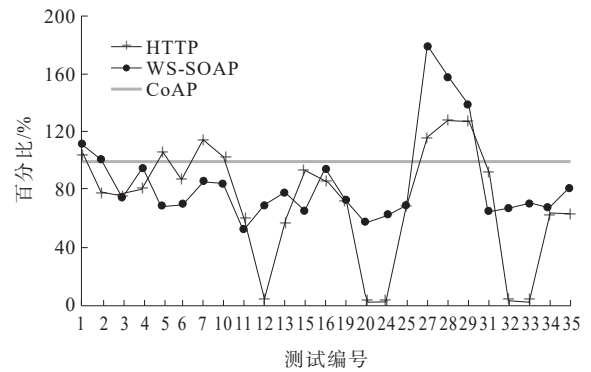


图10 响应时间中位数之比

Figure 10 Ratio of median response time

另外,在表9中观察到几个响应时间中位数值最长高达2~3 s。当需要CoAP的块转移扩展时,就会出现以下情况:CoAP极限载荷为1 024字节,只要有效负载大于1 024字节,就需要将其分块并在不同的消息中发送,包括整个报头,每个块发送都需要在请求下一个块之前进行确认。在这种情况下,HTTP和WS-SOAP的性能优于CoAP。

4.2 通信开销

评估的另一个方面是比较请求、更改或删除服务器数据所需的通信开销。有效载荷和开销的比较如图11所示。在开销方面,计算不同的网络协议为发送数据而添加的字节数,即线路上的字节数减去有效负载。图11中条形表示将数据从服务器发送到客户端所需每个协议资源表示(CoAP、HTTP和SOAP的有效负载分别为CBOR、JSON或XML)的字节数;线形表示不同协议与CoAP相比资源表示的关系。

以CoAP(CBOR)为基准的HTTP(JSON)实现资源表示所需字节的百分比如图12所示。图12

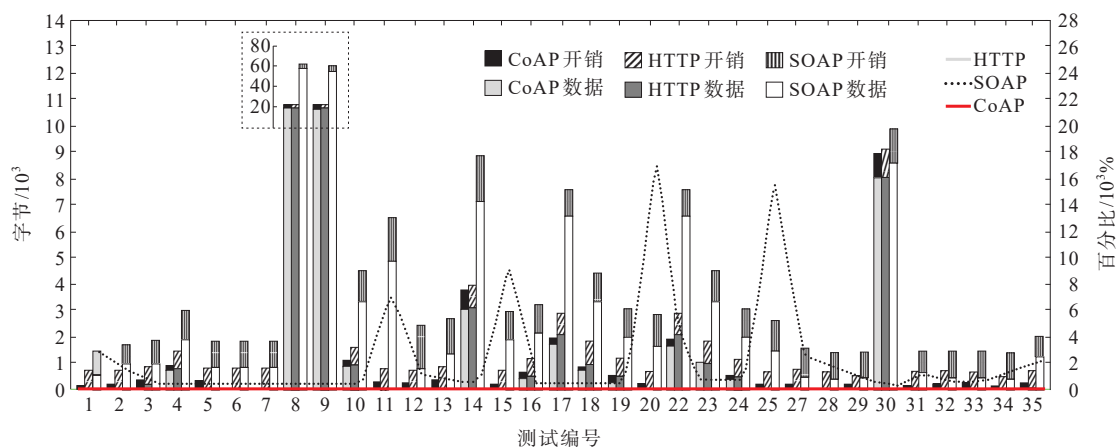


图11 CoAP、HTTP和WS-SOAP的资源表示和开销所需的字节数

Figure 11 Bytes required for resource representation and overhead for CoAP, HTTP, and WS-SOAP

与图 11 共用相同的数据,但重点比较 HTTP (JSON)和 CoAP(CBOR),因为 WS-SOAP (XML)要大得多,高达 17 500%。JSON(HTTP)比 CBOR (CoAP)稍差;与 JSON 相比,CBOR 对所有分析的函数平均需要 89% 的字节数,与 XML 相比只需要 19% 的字节数。

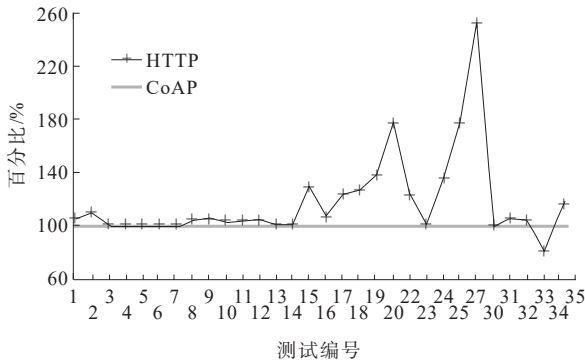


图 12 以 CoAP(CBOR)为基准的 HTTP(JSON)实现资源表示所需字节的百分比

Figure 12 Percentage of required bytes for the resource representation of HTTP(JSON) implementation with CoAP(CBOR) as baseline

就开销而言,WS-SOAP 最大,CoAP 的开销是三者中最低的。然而,在大的有效负载情况下,需要块传输扩展,CoAP 的开销可能比 HTTP 大,因为每个请求都包含整个消息头,而 HTTP 所有消息都使用单个消息头。以 CoAP 作为基线,不同协议发送的总字节数的比较如图 13 所示。与 HTTP+JSON 相比,CoAP+CBOR 平均使用了 44% 的字节,与 WS-SOAP+XML 相比则为 18%。

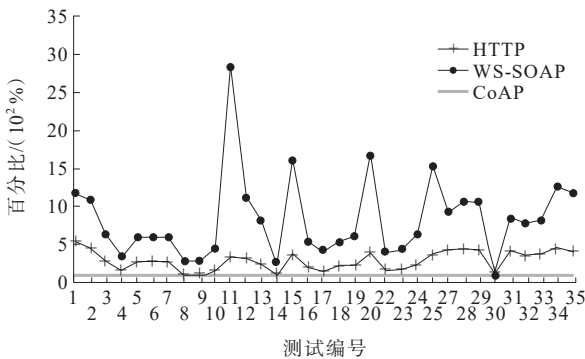


图 13 以 CoAP 为基准的 HTTP 和 WS-SOAP 发送数据所需的总字节数(有效负载+协议开销)的百分比

Figure 13 Percentage of total number of required bytes (payload + protocol overhead) for sending data in HTTP and WS-SOAP implementation with CoAP as baseline

更新 BRCB 或 URCB,并在生成报告时获得报告所需字节数的差异,如图 14 所示,考虑大小不同的 2 个案例。每组的左侧栏表示旧的消息交换,包括资源更新和订阅消息,右侧栏代表带有新选项的消息交换。

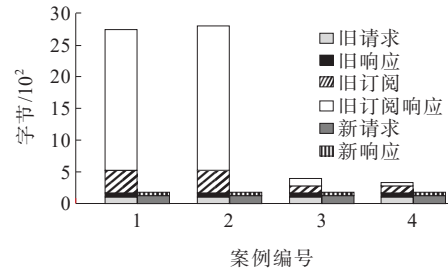


图 14 新、旧方法的开销

Figure 14 Overhead in the old and new approaches

前文描述的评估证明 CoAP 可以用于与 IEC 61850 的通信,与需要轮询报告的 HTTP 和 WSSOAP 相比,这使得 CoAP 更轻量化。但当 CoAP 切换到以块方式传输发送大的有效负载时,HTTP 协议的性能要优于 CoAP。

5 结语

本文提出了一种通信映射方法,结合 CBOR 格式,将 IEC 61850 标准映射到受限应用程序协议 (CoAP);给出了常用 IEC 61850 服务的 CoAP 映射 URI 和请求方法,通过模型搭建验证了映射方法的有效性;提出新的选项和响应代码对 CoAP 订阅模式进行扩展,减少了通信带宽需求;与现有的 WS-SOAP 和 HTTP 映射方案相比,CoAP+CBOR 分别只需要 44%、18% 的信息大小和 71%、85% 的通信时间,CoAP+CBOR 使得通信开销显著降低。

参考文献:

[1] NAIR S A, HOURTOULE J, GASCON J C, et al. IEC-61850-based control system for power distribution at ITER[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 40 (3):596-600.
 [2] 王德文,阎春雨,毕建刚,等. 变电设备在线监测系统中 IEC 61850 的一致性测试[J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (2):79-85.

- WANG Dewen, YAN Chunyu, BI Jiangang, et al. Conformance test of IEC 61850 in online monitoring system of substation equipment[J]. *Power System Automation*,2013,37(2):79-85.
- [3] 宋锦海,宣筱青,朱开阳,等.基于IEC 61850的安全稳定控制装置方案设计[J].*电力系统自动化*,2010,34(12):72-76.
- SONG Jinhai,XUAN Xiaoqing,ZHU Kaiyang,et al.Scheme design of safety and stability control device based on IEC 61850[J].*Power System Automation*,2010,34 (12):72-76.
- [4] IEC TC-57—2003.Communication networks and systems in substations-Part 9-2: specific communication service mapping (SCSM)-sampled values over ISO/IEC 8802-3[S].
- [5] ABDUL-FATAH I, MAJUMDAR S. Performance of CORBA-based client-server architectures[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*,2002,13 (2):111-127.
- [6] ERICSSON G N. Cyber security and power system communication-essential parts of a smart grid infrastructure[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010,25(3):1501-1507.
- [7] ALA AL-FUQAHA, MOHSEN GUIZANI, MEHDI MOHAMMADI. Internet of Things: a survey on enabling technologies, protocols, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys Tutorials*,2015,17(4):2347-2376.
- [8] JANGIRALA S,DAS A K,VASILAKOS A V. Designing secure lightweight blockchain-enabled rfid-based authentication protocol for supply chains in 5G mobile edge computing environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*,2019,25(3):1256-1264.
- [9] ROSELIN A G,NANDA P,NEPAL S,et al.Exploiting the remote server access support of CoAP protocol[J]. *IEEE Internet of Things Journal*,2019,6(6):9338-9349.
- [10] QUINCOZES S,EMILIO T,KAZIENKO J.MQTT protocol: fundamentals, tools and future directions[J]. *IEEE Latin America Transactions*,2019,17(9):1439-1448.
- [11] PETERSEN B,BINDNER H,POULSEN B,et al.Smart grid communication comparison: distributed control middleware and serialization comparison for the Internet of Things[C]//*IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Torino, Italy, 2017.
- [12] BI Y B,JIANG L,WANG X J,et al.Mapping of IEC 61850 to data distribute service for digital substation communication[C]//*IEEE Power & Energy Society General Meeting*,Vancouver,BC,Canada, 2013.
- [13] Suhail S M,et al.IEC 61850 Modeling of DSTATCOM and XMPP communication for reactive power management in microgrids[J]. *IEEE Systems Journal*, 2018, 12(4): 3215-3225.
- [14] IN-JAE S, SONG B K, DOO-SEOP E. International electrical committee (IEC) 61850 mapping with constrained application protocol (CoAP) in smart grids based european telecommunications standard institute machine-to-machine (M2M) environment[J]. *Energies*, 2017,10(3):393-403.
- [15] IGLESIAS-URKIA M, CASADO-MANSILLA D, MAYER S, et al. Enhanced publish/subscribe in CoAP: describing advanced subscription mechanisms for the observe extension[C]//*The 8th International Conference on the Internet of Things*,Santa Barbara,CA,United States,2018.
- [16] PETERSEN B, BINDNER H, YOU S, et al. Smart grid serialization comparison: comparison of serialization for distributed control in the context of the Internet of Things [C]//*IEEE Computing Conference*, London, United Kingdom,2017.
- [17] IGLESIAS A,IGLESIAS-URKIA M,LÓPEZ-DAVALILLO B,et al.Trilateral:software product line based multidomain IoT artifact generation for industrial CPS[C]//*7th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development*,Prague,Czech Republic, 2019.