



TD-SCDMA 网络 Iu-PS 接口协议关联方案的设计与实现^{*}

李 锐, 张治中

(重庆邮电大学通信网与测试技术重点实验室 重庆 400065)

摘 要: 为了对 TD-SCDMA 网络的用户流量进行识别以及对用户行为进行分析, 对 Iu-PS 接口的信令面与业务面协议进行了研究, 设计出一种信令面和业务面协议关联的方案。针对传统信令监测系统和业务监测系统数据处理效率的不足以及无法将信令面与业务面数据进行关联的缺陷, 利用增强型散列算法以及超时处理技术, 设计出一种基于关键字段关联的信令面呼叫详细记录(call detail record, CDR)和业务面呼叫详细记录合成的协议关联方案, 提高了数据处理效率, 并实现了信令面和业务面数据的有效关联, 为后期进行流量识别以及对用户行为进行分析奠定了基础。经过现网数据测试, 验证了该协议关联方案的正确性与可行性, 在移动互联网流量分析领域具有推广意义。

关键词: TD-SCDMA 网络; Iu-PS 接口; 散列算法; 合成; 流量关联

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.09.010

Design and Implementation of Protocols Association Scheme on Iu-PS Interface in TD-SCDMA Network

Li Rui, Zhang Zhizhong

(Key Laboratory on Communication Network and Testing Technology,

Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to identify the user traffic and analysis the user behavior on Iu-PS interface in TD-SCDMA network, the signaling plane protocol stack and the service plane protocol stack of Iu-PS interface were analysed and a scheme that associated with signaling plane protocols and service plane protocols were designed. In view of the low processing efficiency of signaling and service monitoring system and inability to associate with both signaling and service data, using the enhanced Hash algorithm and timeout processing technology, a protocols association scheme with synthetic solution of call detail record in both signaling and service plane were designed, which based on a key words association method. The scheme improves the efficiency of data processing, implements the effective association between signaling data and service data, and also lays the foundation for traffic identification and user behavior analysis. The accuracy and feasibility of this protocol association scheme has been validated by the real network testing, and this scheme has the important significance to promote in the field of mobile Internet traffic analysis.

Key words: TD-SCDMA network, Iu-PS interface, Hash algorithm, composing, traffic association

^{*} 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2014AA01A706), 国家科技重大专项基金资助项目(No.2012ZX03001021), 重庆高校创新团队基金资助项目(2013)

1 引言

随着 TD-SCDMA 网络的蓬勃发展,新业务不断推出,用户数不断地增加^[1],到目前为止使用手机接入互联网的网民数量已经超过使用台式电脑上网的用户数量^[2],用户流量也直线增长。TD-SCDMA 网络在给用户带来高速数据业务服务的同时,也给运营商网络的运营支撑和运营管理带来了巨大的压力。传统的网络运营模式中,运营商仅仅是对承载网“管道化”的运营,无法很好地区分管道内的内容和信息^[3];计费策略和业务控制模式也相对单一,无法基于区分用户和区分业务提供差异化的服务^[3,4]。

针对目前形势,迫切地需要研究出一种高效且准确的流量识别方法。然而,现网中包含了信令面和业务面的数据,信令面和业务面数据又包含了多个流程,并且各个用户的数据又错综复杂地交织在了一起,对流量分析造成了很大的难度。而这其中最重要的就是把相关数据高效地关联在一起。由于用户的 IMSI、IMEI 等身份信息存储在信令面,上网时访问的网页信息则存储在业务面。并且,目前国内设计的信令监测系统和业务监测系统^[5,6]均是单独对信令面或业务面进行处理,无法针对特定用户进行用户行为分析,并且效率也逐渐难以满足海量数据的处理。为了弥补这些不足,可以采取一种将信令面与业务面协议关联的方案,并且采取一种高效的关联算法对数据进行处理。

本文将重点研究 TD-SCDMA 网络 Iu-PS 接口信令面与业务面协议内部及协议间的关联,实现了一套基于增强型散列算法的高效数据关联方案。

2 Iu-PS 接口及协议关联方案总体框架

Iu-PS 接口是 TD-SCDMA 网络中非常重要的一个接口,它是连接 UTRAN 和 CN 的分组域之间的接口,负责 RNC 和 SGSN 之间的通信。Iu-PS 接口包括业务面和信令面两个部分,两个平面的协议层次自底向上都包括无线网络层和传输层。图 1 为 Iu-PS 接口协议栈。

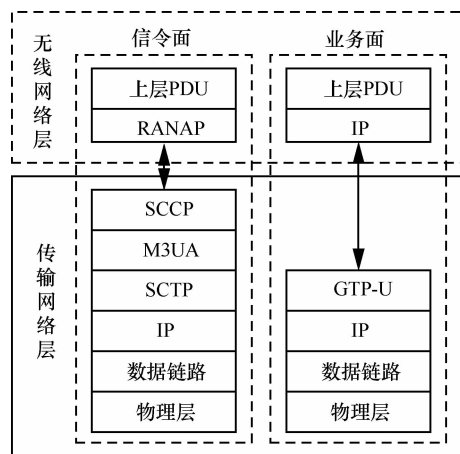


图 1 Iu-PS 接口协议栈

其中,通用分组无线业务(general packet radio service, GPRS)隧道协议(GTP)是一组基于 IP 的、用于在 GSM、UMTS 或 TD-SCDMA 网络中支持 GPRS 的通信协议。在 TD-SCDMA 网络中为用户面 GTP-U 协议^[7]。GTP-U 接口实现 UTRAN 和 SGSN 实体之间的用户面数据传输,GTP-U 以 UDP 为承载协议,可以传输 IPv4、IPv6、PPP 等格式的任何用户数据。Iu-PS 接口控制面采用了流控制传输协议(stream control transmission protocol, SCTP)提供可靠的传输, SCTP 之上依次承载 M3UA (MTP 3 user adaptation)、SCCP (signal connection control protocol)、RANAP (radio access network application part)^[8]、GMM (GPRS mobility management)或 SM(service message)协议^[9]。由于 TD-SCDMA 网络大规模商用,基于用户流量的分析已经成为 TD-SCDMA 网络监测的重点,因此本方案选取 Iu-PS 接口作为采集点。

Iu-PS 接口流量关联方案采用模块化思想,将不同的模块封装成动态链接库(dynamic link library, DLL),以实现各个模块的松耦合。根据相关规范的要求^[10],TD-SCDMA 网络流量关联系统包括了数据采集、协议栈解码、协议内部关联、CDR 合成、CDR 关联、CDR 出表等模块,如图 2 所示。

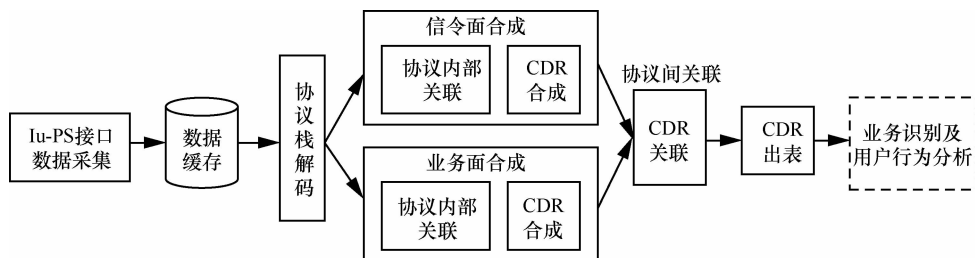


图 2 系统框架



3 Iu-PS 接口解码模块设计

协议解码分成两种类型:简单解码和详细解码。简单解码是根据原始数据提取关键信息,对指针偏移即可。对原始数据逐字节逐比特地解码,并生成相关解释说明信息,则为详细解码模块^[1]。详细解码结果经封装后在信令监测系统界面上以树型图展现,方便用户快速理解消息数据代表的信息^[5]。简单解码结果经封装后用于后期流量分析及合成模块的处理。

采集卡从 Iu-PS 接口采集数据,数据备份在本地磁盘里,采集系统对数据进行预处理送入分流模块并获取消息 IP 层上层消息类型,判断是 SCTP 还是 UDP,其中若是 UDP 则对应业务面,若是 SCTP 则对应信令面。然后送到相应的信令面和业务面协议栈解码器,并获取起始解码的协议 ID,进入对应的协议解码器。信令面的协议栈解码器包括 Ethernet 解码器、IP 解码器、SCTP 解码器、M3UA 解码器、SCCP 解码器、RANAP 解码器、GMM 解码器、SM 解码器。业务面的协议栈解码器包括 Ethernet 解码器、IP 解码器、UDP 解码器、GTP 解码器、传输层 IP 解码器、TCP 解码器、HTTP 解码器、DNS 解码器等。在解码器里,调用协议解

码接口进行解码。当该层协议解码完成后,添加解码结果到 pCallinfo 结构体中,并识别上层协议类型,并标示上层协议的 ID。

如果只有一个上层协议,则调用回调接口函数,继续解析消息,并更新 pCallinfo 结构体;如果有 2 个以上协议分组,则需要查询上层协议 ID,再调了解码函数。在 PS 域里,可以开多个线程同时解码信令面和业务面,提高处理速度^[1]。图 3 为解码流程。

4 增强型散列算法

现有的监测分析系统,有的采用了除留余数法^[9],有的采用了平方取中法^[10]。

除留余数法模型为:

$$A_i = key \% n (i=1,2,\dots,k(k \leq n-1)) \quad (1)$$

平方取中法模型为:

$$A_i = H(key^2) \% n (i=1,2,\dots,k(k \leq n-1)) \quad (2)$$

其中, $H(x)$ 函数表示取 x 的二进制码中间若干位作为计算地址,所取的位数可以根据实际情况进行调整。

这些算法都无法避免会产生冲突,产生冲突后往往需要查找到下一个非空的散列表地址进行存储。该算法模型为:

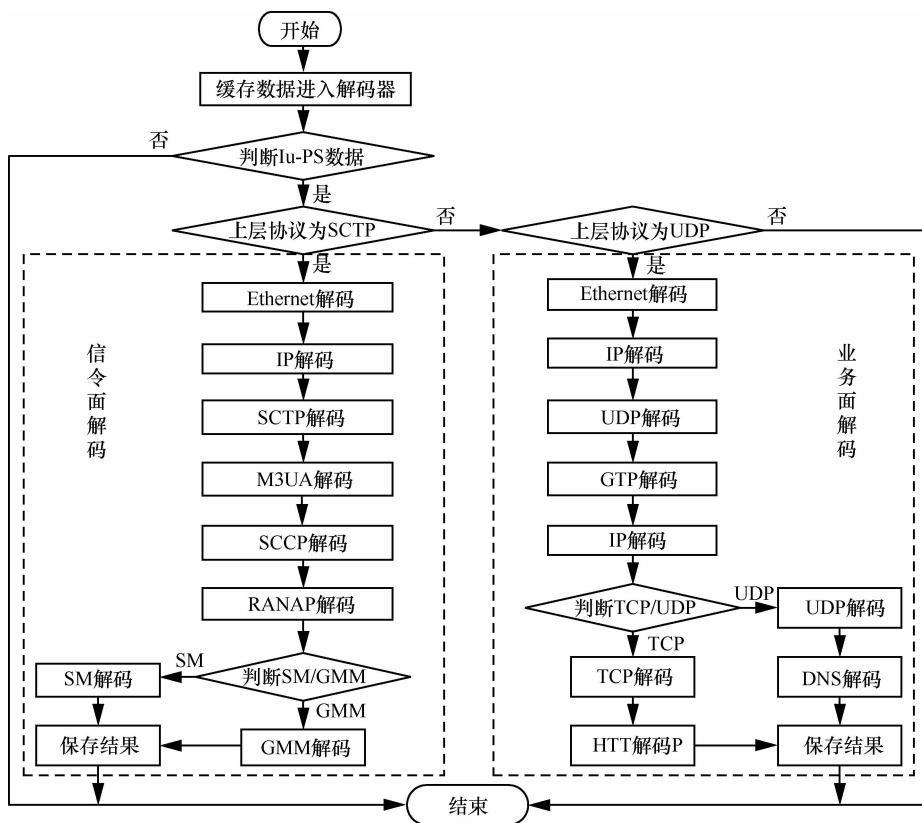


图3 解码流程

$$A_i = (H_i(x) + d_k) \% n(i, j, k = 1, 2, \dots, m(m \leq n-1)) \quad (3)$$

此时,如果某 key 值经过对应的散列算法后得到的地址对应到之前解决冲突后的 key 值所对应的地址时,原本没有冲突的地址现在却产生了冲突,为了避免冲突,又不得不再去申请下一个空闲的地址,从而潜在地又给下次申请散列地址时造成了冲突的可能,在这一系列的冲突处理过程中将会消耗大量的系统资源,进而影响系统的效率。因此,需要采用一种较好的方法来解决该问题。

为了有效地解决冲突并且同时具有相对高的效率,该方案采取了基于除留余数法的增强型散列算法模型。该方法将除留余数法与散列桶的思想结合在一起,可以很好地对 key 值进行处理^[12,13]。图 4 为该模型。

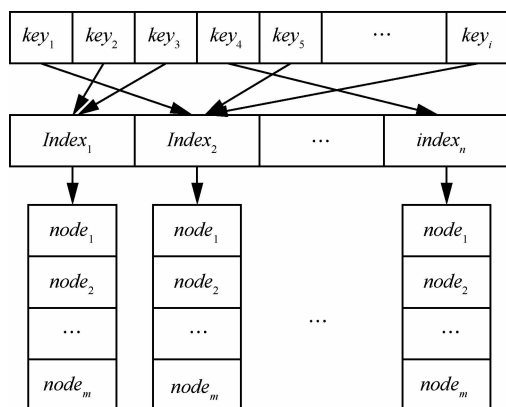


图 4 增强型散列算法模型

除留余数获取索引值模型为：

$$index_i = key_i \% n(i=1, 2, \dots, m(m \leq n-1)) \quad (4)$$

基于除留余数法的散列桶存储模型如下。

在每一个散列桶里挂载多个索引号相同的节点。这些节点存储着该节点结构体指针对应的地址,而该结构体的头部存储着该节点的 key 值。每次具有相同 $index$ 值的消息到来时首先查看该 $index$ 的索引有无节点,若无节点,则需要在桶中创建一个新的节点;若有节点,则直接在该桶中增加一个节点。利用如上方法可以完全避免节点地址的冲突。再结合设定的合适散列桶数量以及适当的超时时间可以有效提高效率。超时将在下一节论述。

该模型的实现方法如下。

设输入为：

$key = (key_1, key_2, key_3, \dots, key_n)$, 其中 key 值服从均匀分布。

输出为：

$$index = (index_1, index_2, index_3, \dots, index_n)。$$

满足 $(index_1 \leq index_2 \leq index_3 \leq \dots \leq index_n)$, 并且有 $node = (node_1, node_2, node_3, \dots, node_n)$, 为对应的链表节点头指针。

当 $1 \leq i \leq n-1$ 时：

$$node_i = key_i \% nCapacity(i=1, 2, 3, \dots, m(m \leq n-1)) \quad (5)$$

当 $1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq n-1$ 且 $node_i = node_{i+k}$ 时：

$$index_n = node_i + node_{i+k} \quad (6)$$

其中, $nCapacity$ 为散列桶数, $index$ 为散列桶数索引号。

由于落入桶中的 key 值无法事先确定, 对于任意 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$, 定义 $\phi_i = \begin{cases} 1, & key_i \text{ 落入桶 } index_j \text{ 中} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, 则桶

$index_j$ 中 key 值总数为 $\sum_{i=1}^n \phi_i$, 在 key 值服从均匀分布时, $P_{\phi_i=1} = 1/n$, 所以 $E(\phi_i) = E(\phi_i^2) = 1/n$, 可以得：

$$\begin{aligned} E\left(\sum_{i=1}^n \phi_i\right)^2 &= \sum_{i=1}^n E(\phi_i^2) + \sum_{i \neq j} \phi_i \times \phi_j \\ &= n \times \left(\frac{1}{n}\right) + n \times (n-1) \times \left(\frac{1}{n}\right)^2 = 2 - \frac{1}{n} \quad (7) \end{aligned}$$

由于 key_i 对于 $1 \leq i \leq n$ 成立, 可以得到所消耗总时间为 $O(2n-1)$, 即 $O(n)$ 。

该增强型散列算法与其他算法相比有较快的时间处理能力, 同时具有较好的冲突解决能力, 因此将用于关联、合成、超时以及后期流量识别中关键字的处理。

5 合成模块的设计与实现

消息流程合成也叫 CDR 合成, CDR 合成是流量分析和信息统计功能的基础^[11]。将 Iu 接口 PS 域消息按照信令流程和业务流程进行归类, 并用散列算法把这些属于同一呼叫流程的消息关联到一起, 从而完成性能统计和流量统计等高级功能^[6,11]。

5.1 信令面合成模块

Iu -PS 接口信令面建立在 SCTP 连接之上, 在一次 SCTP 连接上往往存在多个相同或者不同的业务, 为了分析数据与数据之间的联系, 业务之间需要相互关联^[11]。 Iu -PS 接口信令面的合成分为全局 CDR 合成和子 CDR 合成, 全局 CDR 是用户整个通信过程的流程, 该过程提取各个协议的层次属性, 从而获得用户的身份属性、位置属性、通信属性以及通信质量等参数。子 CDR 则是该过程中的某一个状态流程, 其中子 CDR 流程包括 SCCP、RANAP、



GMM、SM 4 种流程类型,它们依次对应为 CR(连接建立)、CC(连接确认)、RLSD(连接释放)、RLC(释放完成);RAB assignment(无线接入承载分配)、relocation(重定位)、RAU(路由更新);attach(附着)、detach(分离)、auth(鉴权);PDP(分组数据协议)激活、PDP 修改、PDP 去活。子 CDR 反映了各状态的资源分配情况,进而可以评价用户通信的质量。

5.1.1 信令面协议内部关联

对于 Iu-PS 信令面接口,不同的消息需要具有的相同特征值才能对其进行关联。只有将消息关联后才能对其进行合成。因此,选取 M3UA 层中的 OPC(源信令点编码)和 DPC(目的信令点编码)以及 SCCP 层中的 SLR(源地址本地参考)和 DLR(目的地址本地参考)作为关键字,匹配算法为:

$$key=(OPC \ll 16 + SLR) \parallel (DPC \ll 16 + DLR) \quad (8)$$

该 key 值默认值为 0,当 SCCP CR 消息到来时给出一个新的 key 值,为了加入散列表时 key 值为均匀分布,此时只需自增 1 即可。当下一条消息来的时候,若关键字匹配,则可以判定为同一流程的消息,并给出一个与该流程 CR 消息相同的 key 值。

5.1.2 合成流程

每一个全局 CDR 都由若干个子 CDR 构成并且存放在一个缓存中,而且全局 CDR 都是由 SCCP 的 CR 消息开始,并以 SCCP 的 RLC 消息结束。当 CR 消息来的时候创建一个全局 CDR 结构体,并分配一个全局 CDR ID 号,当接下来消息来临的时候,若存在相同的 key 值,先判断是否属于子 CDR 消息,若属于某个子 CDR 但子 CDR 不存在,则需要创建该子 CDR。若 CDR 存在,只需将该 CDR 提取出来修改其对应属性,再添加到 CDR 的缓存中。

若是 SCCP RLC 消息到来或者该全局 CDR 已经超时,则需要将该全局 CDR 取出并存盘,最后,删除该全局 CDR 的所有节点以及对应的 key 值,释放散列表相应节点占用的空间。图 5 为信令合成流程。

5.2 业务面合成模块

Iu-PS 接口业务面建立在 UDP 连接上,由于一个流程的 CDR 条数较少,业务面子 CDR 即为全局 CDR,其流程主要包括:TCP 建立、HTTP 传输、DNS 服务等。业务面的合成可以对用户上网综合性能如时长、流量、时延等方面进

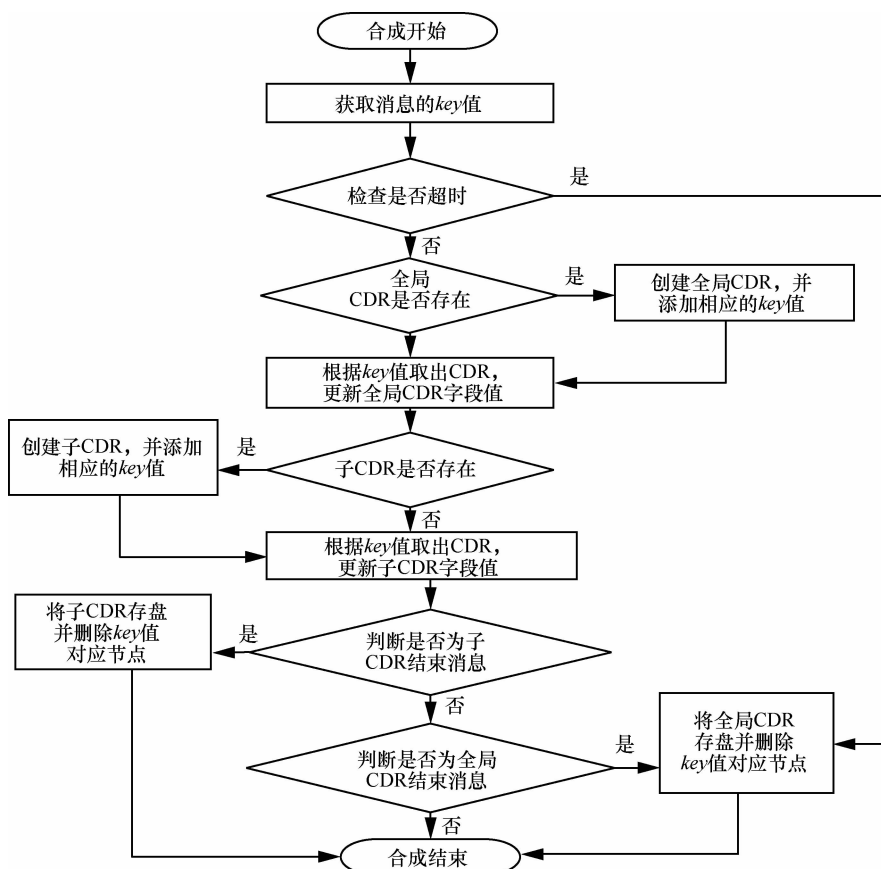


图 5 信令面合成流程

行综合评价,并且为后期流量识别提供原始数据。

5.2.1 业务面协议内部关联

在 Iu-PS 业务面采用的是 UDP 层的 src_port (源端口)、 dst_port (目的端口) 和 IP 层的 src_ip (源 IP 地址)、 dst_ip (目的 IP 地址) 作为关键字进行匹配,匹配算法如下:

$$\text{key}=(\text{src_port}<<32+\text{src_ip})\|(\text{dst_port}<<32+\text{dst_ip}) \quad (9)$$

HTTP 和 DNS 消息均是采用请求消息作为开始消息, TCP 则是以第一条消息到来为开始消息,当开始消息来到时,需要创建该业务的 key 值。之后到来的消息若以上两组元素分别对应相同,则赋予对应的 key 值,该 key 值仍然采用自增 1 的方式进行取值。

5.2.2 合成流程

每条消息到来的时候,先判断是该消息的消息类型,若为开始的请求消息,则创建该消息的结构体,若遇到 HTTP、DNS 响应消息、带确认号的 TCP 消息或者消息超时,则对应 CDR 结束。此时将 CDR 存盘并删除散列表 key 值,释放节点空间。图 6 为业务面合成流程。

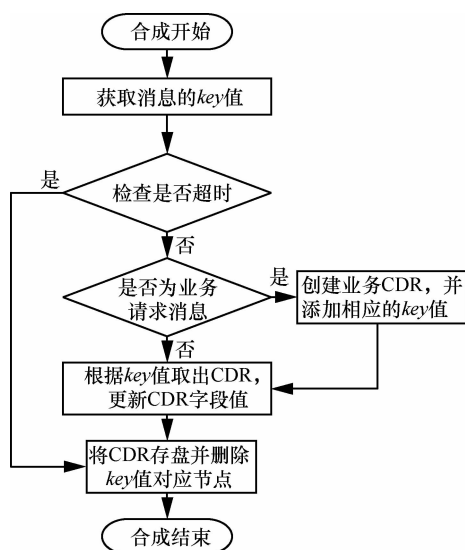


图6 业务面合成流程

6 超时模块的设计

由于网络中的数据存在诸多不确定因素,网络异常、用户端异常或自然环境因素的影响,都会造成数据的不稳定而导致分组丢失现象的发生^[6]。因此 SCCP RLC 消息或者业务面响应消息可能不会到来,或者很长时间才会到来,此时继续等待结束消息的到来将会占用不必要的资源。若不进行处理,较大量消息一直等待结束消息,系统资源将会造成极大的浪费。

由此,该系统将采用超时检测模块来提高处理效率。通过设定超时时间,将现网消息到来的时间和 CDR 开始时间进行对比,若大于或等于超时时间,则判定为超时。为了避免影响合成的效率,超时模块将另外设置一个散列表并且仍然采用增强型散列算法,与合成模块不同的是该散列表只用存储对应 CDR 的 key 值和该 CDR 的开始时间。每当一条消息来临时将会与各 CDR 开始时间进行对比,若发现超时,则将该 CDR 开始时间对应的 key 值取出,并将该 key 值对应的合成 CDR 存盘并删除,同时将超时散列表内的相应节点删除。图 7 为超时流程。

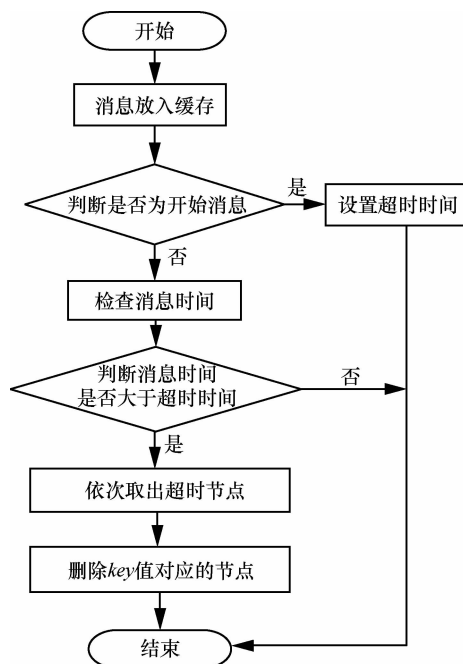


图7 超时流程

7 信令面与业务面的协议间关联

由于信令面和业务面反映了用户上网过程中不同层面的性能状况,它们有各自的特点但却是彼此相互关联的。一个用户上网过程必然是先建立信令面的连接,再建立业务面的连接,等到业务面流程完毕之后,最后释放信令面的连接。因此,同时对比分析信令面与业务面的消息流程才能更有效地评价其上网的质量,并可以对特定用户的行为进行分析,从而避免了数据分析的盲目性。

为了关联信令面与业务面的 CDR,该系统选择三层 IP 地址作为关联字段,该字段在信令面业务消息过程中的分组数据协议接收过程中产生并分配给用户,在业务面用户利用该 IP 地址申请并访问网络上的各种业务,匹配算



法如下:

$$key=layer3_ip_addr \quad (10)$$

该流程是将信令面和业务面的 CDR 放入缓存中,通过增强型散列算法将 CDRID 与 key 值一一对应并存入散列表。若信令面的 key 值与业务面的 key 值相同,则将对 CDR 取出并生成一个新的 CDR,并对其进行出表,以便后续使用。若信令面消息超时,或者信令面流程结束,则直接将 CDR 进行出表,并删除相应的 key 值。通过该 IP 地址可以将信令面和业务面有效地关联到一起。

关联在一起后从该分析系统中可以很容易的看出连接时间、上下行流量、用户访问网页的 host、URI 以及具体业务对应的用户,为后期流量识别及用户行为分析提供支持。

8 协议关联分析

将 Iu-PS 接口采集的数据发送到解码模块,经过解码后分别进行信令面和业务面的关联与合成,然后再将业务面和信令面的 CDR 进行关联出表,得到协议关联后的出表文件。

8.1 效率分析

利用除留余数法、平方取中法和增强型散列算法处理不同数量的消息,并对其处理时间进行统计可以得到如图 8 所示的结果。从图中可以看出除留余数法、平方取中法的处理时间随消息条数的增多而呈现出类似指数型的增长,而该增强型散列算法的处理时间呈现出类似线性的增长方式,并且效率远远高于前两种方法。

8.2 正确性分析

图 9(截图)为出表文件的其中一段,其中 IMSI、TMSI、MCC、MNC、USER_IP 等为信令面所包含的字段,host、URI、USER_IP、上下行流量等为业务面所包含的字段。图 10 为整个合成及关联的流程,图中显示了信令 CDR 与业务 CDR 关联的流程。该处选取了第二条全局 CDR,从图 10 中可以看出,信令面的 CDR 完成了信令数据连接的建立,业务面完成了业务连接的建立和释放。该信令 CDR 关联了 3 个业务 CDR,通过对比图 9 的第二条记录的 host、URI

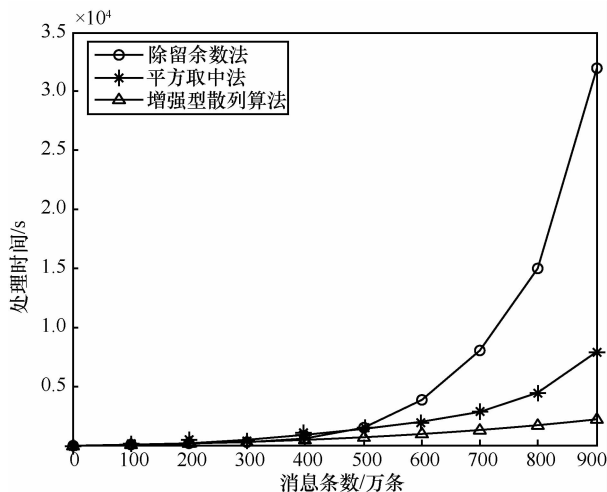


图 8 算法效率对比

和图 10 的业务请求消息可以看出该 host、URI 相同,从而进一步证明了流量关联的正确性。

9 结束语

本文提出了一种 TD-SCDMA 网络 Iu-PS 接口协议关联方案。首先分析了目前流量分析的现状和不足。然后在传统的信令监测系统和业务监测系统的基础上,利用增强型散列算法对信令面和业务面数据进行了有效的关联,并且提高了数据处理的效率。该方案基于 Windows 和 Linux 平台,经过现网数据的测试,该协议关联系统能够稳定并且高效地运行。

参考文献

- 席兵,郑小平. CDMA 网络 Abis 接口信令解码方案设计. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2013, 25(4):455~458
- 李雅靖. CDMA 网络流量监测及用户行为分析. 北京邮电大学硕士学位论文,2013
- 王攀. IP 网络业务识别关键技术研究. 南京邮电大学博士学位论文,2013
- 罗军舟,吴文甲,杨明. 移动互联网:终端、网络与服务. 计算机学报,2011,34(11):2029~2051
- 李丹凤,张治中. NGN 网络监测系统中 BICC 协议的研究与应用. 电信科学,2012, 28(3):68~72

	INTERFACE	DIM	TIME	IMSI	TMSI	MCC	MNC	LAC	RAT	USER_IP	USER_PORT	UL_FLOW	DL_FLOW	HOST	URI
1	3	2013/7/4	460000315018936	4014345584	460	0	41751	0	010.132.112.016	53349	660	21862	masns.qpic.cn	/masns/C1K0k0Gk67KSxr4d4bl3PMk19WIsit	
2	3	2013/7/4	4600021230178906	4165357072	460	0	41734	0	010.032.048.201	50456	1549	471	monitor.uu.qq.com	http://monitor.uu.qq.com/analytics/upl	
3	3	2013/7/4	460002350132907	4198643041	460	0	41734	0	010.032.048.215	47012	319	340	c.tieba.baidu.com	/c/c/post/add	
4	3	2013/7/4	460002350147749	4098020976	460	0	41751	0	010.150.217.154	1281	782	12240	ww1.sinaimg.cn	/wap/20/8f8acaf4gw1e92by240qxj20cz0jgc	
5	3	2013/7/4	460002882521611	4148311297	460	0	41750	0	010.024.236.210	63351	562	270	adimg.aobile.sina.c	/public/files/common/version.txt	
6	3	2013/7/4	460002892551828	4064561208	460	0	41762	0	010.187.037.174	35002	336	11823	api.kuaidi.360.cn	/intf.php?method=Message.pushClient&tc	
7	3	2013/7/4	460002912539706	3678848032	460	0	41757	0	010.151.087.164	53376	157	30518	s.cimg.163.com	/i/img1.126.net/channel4/015114/yule64	

图 9 关联结果出表文件

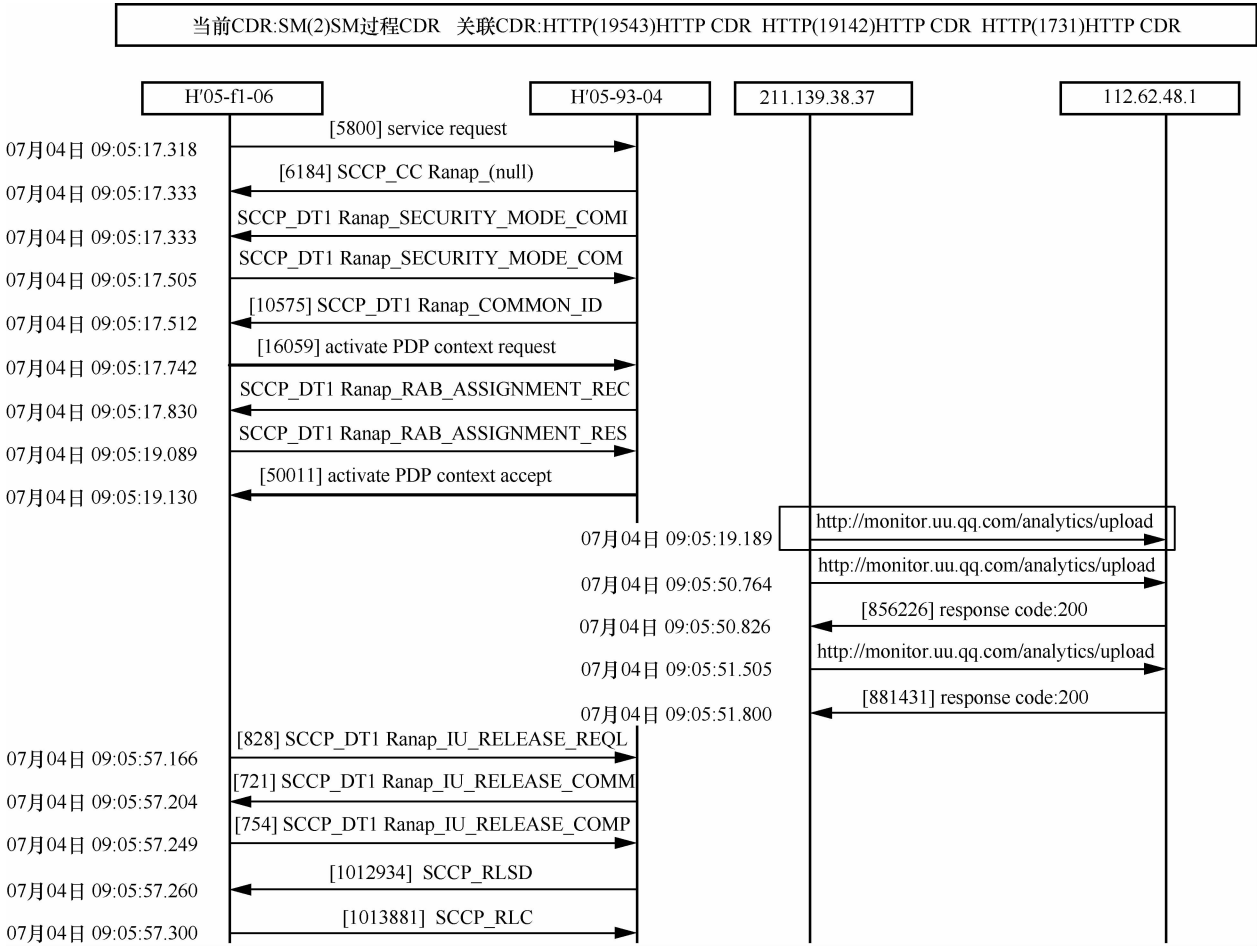


图 10 合成及关联结果

6 李艳, 张治中. LTE 网络 S1AP 监测方案的研究与实现. 电信科学, 2013, 29(1):31~45

7 3GPP TS 29.060 V8.2.0. Technical Specification Group Core Network and Terminals; General Packet Radio Service (GPRS); GPRS Tunnelling Protocol (GTP) Across the Gn and Gp Interface (Release 8), 2007

8 3GPP TS 25.413 V11.4.0. Technical Specification Group Radio Access Network; UTRAN Iu Interface Radio Access Network Application Part (RANAP) Signalling (Release 11), 2013

9 3GPP TS 24.008 V7.7.0. Technical Specification Group Core Network and Terminals; Mobile Radio Interface Layer 3 Specification; Core Network Protocols; Stage 3 (Release 7), 2007

10 中国移动通信集团公司. 上网日志留存系统测试规范—Gb_IuPS 采集网关分册, 2013

11 陈玉花, 张治中, 左书川等. TD-SCDMA 网络 Iu-PS 口 CDR 合成方案研究. 电信科学, 2009, 25(11):50~54

12 Chen T S, Chou Y S. Mining user movement behavior patterns in a mobile service environment. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2012, 42(1):87~101

13 杨磊, 黄辉, 宋涛. 桶外排序算法的抽样分点分发策略. 软件学报, 2005, 16(5):643~651

14 赵国锋, 赖雯静, 徐川等. 移动互联网的业务访问特性. 计算机学报, 2013, 36(7):1388~1398

15 杨磊, 宋涛. 基于数组的桶排序算法. 计算机研究与发展, 2007, 44(2):341~347

[作者简介]



李锐, 男, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为宽带通信网测试技术。

张治中, 男, 重庆邮电大学博士生导师, 主要研究方向为第三代移动通信测试技术、宽带信息网络、NGN 等。

(收稿日期: 2014-06-09)