

刘 DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.001

LTE-Advanced 空口监测与分析关键技术研究^{*}

刘祖深¹ 张 煜²

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所 蚌埠 233010;

2. 电子信息测试技术安徽省重点实验室 蚌埠 233010)

摘 要:空口是终端和基站之间接口,用来建立、重配置和释放各种无线承载业务,是完全开放并保证不同制造商生产的设备互联互通的重要接口,LTE-Advanced 空口监测针对最为复杂的空口协议,提供了对空口无线信号的监测和检查的手段,为终端、网络的一致性测试提供第三方评价工具。整体设计通过构建 LTE-Advanced 空口监测与分析仪表的总体方案,采用多用户随机接入、空口协议分析、安全算法、载波聚合以及多用户业务行为感知的检测与分析等多项关键技术,实现了 LTE-Advanced 空口 L1、L2、L3 的协议栈监测、跨层关联分析、5 载波聚合分析、48 用户业务跟踪、信令过程和用户业务行为监测等完整的空口监测功能。测试和验证结果表明,所有测试均符合标准协议流程,与基站和终端之间实际行为完全一致,为通信设备互联互通存在的各类故障分析和定位提供重要的测试手段,对 TD-LTE-Advanced 网络建设与优化具有重要意义。

关键词:空中接口; RRC; 加密业务行为感知; 多用户接入

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research on the key technologies of LTE-advanced uu monitoring and analysis

Liu Zushen¹ Zhang Yu²

(1. The 41st Institute of CETC, Bengbu 233010, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Information Testing Technology, Bengbu 233010, China)

Abstract:Uu is defined as the interface between UE and base station, and which undertakes the establishment, reconfiguration, release of wireless carrier service, guarantees the interconnection and intercommunication of equipment from different manufacturers. LTE-Advanced uu monitoring instruments based on the most complex protocol provide detection and inspection method for uu wireless signals and third-party evaluation tool for conformance testing of UE and networks. The conceptual design scheme for LTE-Advanced uu monitoring and analyzing instrument is introduced in the paper. Furthermore, the key technologies including multi-user random access, uu protocol analysis, security algorithm, carrier aggregation and multi-user behavior sensing are adopted to realize the function of L1, L2, L3 protocol analysis for LTE-Advanced uu, cross level correlation analysis, 5-carrier aggregation analysis, 48-user service tracing, signal processing and user behavior monitoring. All testing process accord with standard protocol flow, and the results are full agreement with the actual behavior of UE and base station. Therefore, the testing means for fault diagnostics and locating of equipment interconnection and intercommunication are provided, and it makes great sense for TD-LTE-Advanced network construction and optimization.

Keywords:uu; RRC; encryption business behavior sensing; multi-user access

0 引 言

空口是指终端和接入网之间的接口,也称 Uu 口,在 LTE/LTE-Advanced 架构系统中,空口具体是指终端和 eNodeB 之间的接口,是一个完全开放的用来建立、承载和释放各种无线业务信令的接口^[1-3]。在芯片、终端和网络设备的开发,特别是网络建设中,需要对各层协议进行详细解析,便于问题的分析和定位,也需要对用户业务行为进行分析。空口监测与分析技术不仅涉及到支持 PHY、MAC、RLC、PDCP、RRC 和 NAS 控制面协议栈分析,还要支持 PHY、MAC、RLC、PDCP、IP 和应用用户面协议栈分析^[4]。因此,空口信号的多层协议解析变得非常复杂。目前,国际上只有少数几个仪器厂家掌握空口测试技术,并有相应产品问世。国际上只有少数几个仪器厂家掌握空口测试技术,并有相应产品问世。

介绍了 LTE-Advanced 空口监测与分析仪表的总体设计方案,详细讨论了多用户随机接入、空口协议分析、安全算法、载波聚合以及多用户业务行为感知的检测与分析等关键技术,给出了支持 LTE-Advanced 空口 L1、L2、L3 的协议栈监测、跨层关联分析、多用户业务建立、信令过程和用户业务行为等具体的监测与分析流程和算法,以及具体产品实现方案,并给出了典型场景的测试支撑数据和结果。

1 空口监测与分析整机原理框架

由于空口信号具有复杂的噪声干扰,上行和下行的信号功率落差巨大,以及采样数据量大等显著特征,造成空口信号的采集和处理难度很大,接收机必须具有较高的灵敏度和较大的动态范围,分析带宽单载波满足 20 MHz,载波聚合满足 100 MHz,以及强大的基带和协议栈处理能力^[5-6]。

LTE-A 空口监测仪整机原理框架如图 1 所示,它由射频前端接收模块、中频高速处理模块、基带处理模块、系统处理模块和测试模块组成。其中 LTE-Advanced 宽带射频通道接收模块采用高本振下变频的方案,全数字中频技术实现 100 MHz 带宽的信号处理。射频性能达到频率范围 400 ~ 6 000 MHz;频率误差小于 $\pm 0.1 \times 10^{-6}$;分析带宽 5、10、15、20、100 MHz;动态范围大于 80 dB;灵敏度优于 -94 dBm@ BW:20 MHz。

在 LTE-Advanced 高速基带处理方面,满足 LTE-Advanced 多小区、多天线和多频段的并行同步监测需要,采用具备 AGC 功能的多路高速数字采样链路,多路 ADC 并行采样可以同时支持 5 载波聚合,包括 intra-band、inter-band 载波聚合,满足 100 MHz 带宽的测试需求。在协议解

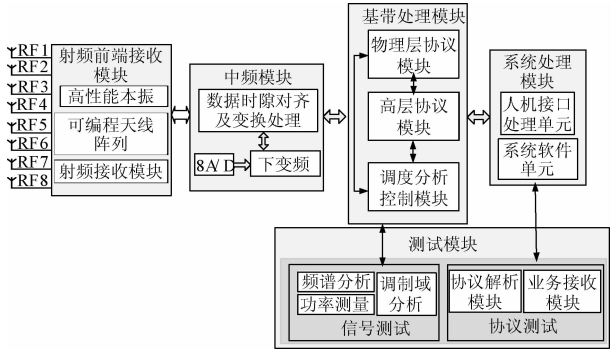


图 1 LTE-Advanced 空口监测仪整机原理框架

Fig. 1 Framework of LTE-Advanced uu monitoring instruments principle

析方面,支持 PHY、MAC、RLC、PDCP、RRC 和 NAS 控制面协议栈,以及 PHY、MAC、RLC、PDCP、IP 和应用用户面协议栈的监测。支持 eICIC、UL MIMO、下行基于码本的 8 d 线单/双流发送等空口信息解析。平台的设计考虑了模块化与开放性,有利于产品的系列化和标准长期演进。

2 空口监测与分析关键技术

2.1 多层协议分析

支持多用户与多小区的空口多层协议跟踪和分析,其核心问题是空口多用户接入和跨层关联分析,协议分析总体框架如图 2 所示。

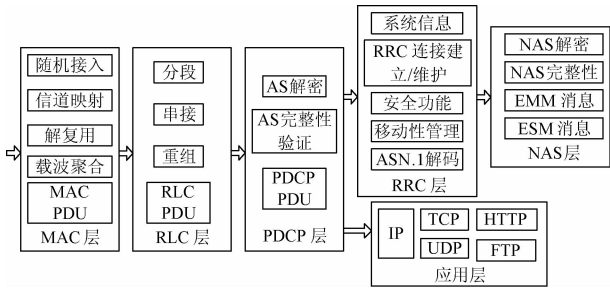


图 2 多层协议分析总体框图

Fig. 2 General block diagram of multi-layer protocol analysis

多层协议分析主要包括 MAC 层协议处理、RLC 层协议处理、PDCP 层协议处理、RRC 层协议处理、NAS 层协议处理、应用层协议处理和安全算法等模块等。MAC 层协议处理模块,主要完成随机接入过程、传输信道到逻辑信道的映射,来自多个逻辑信道的 MAC 服务数据单元 (SDU) 的解复用,以及各种 MAC 控制单元的分析等^[7]。RLC 层协议处理模块,主要完成对 RLC SDU 的分段、串接、重组,对高层数据的按序递交等。PDCP 层协议处理模块,主要完成控制面解密和完整性保护、用户面解密以

及数据的传输等^[8]。RRC 层协议处理模块,主要完成系统信息广播、RRC 连接建立/维护/释放、安全功能密钥管理、无线承载管理、移动性管理、ASN.1 解码等功能分析处理^[9]。NAS 层协议处理模块,主要完成演进数据包系统(EPS)承载管理、鉴权、非接入层解密和完整性保护等功能处理^[10]。应用层协议处理模块,主要完成 IP、TCP、UDP、HTTP 和 FTP 等协议分析处理。安全算法模块^[11],主要包括密钥推演、PDCP 层中的 AS 解密和完整性验证,以及 NAS 层中的解密和完整性验证。

2.2 多用户随机接入

多用户随机接入是 LTE-Advanced 空口协议分析的关键步骤。

LTE-Advanced 系统中,随机接入是终端和基站互连的第一步。在终端和基站互连过程中,需要依次经过 SI-RNTI、RA-RNTI、TC-RNTI 和 C-RNTI 四种状态,这 4 种状态变换迅速,只要有任意一种状态没有监测到,后续的终端和基站互连过程也就无法监测到。因此,监测仪需要能够准确、快速地跟踪监测到终端和基站之间的这种状态变换。

当多终端同时接入时,由于随机接入前导码是在 64 个中随机选择,因此可能发生终端间的碰撞,导致部分终端接入失败,因此,空口监测仪需要能够正确的分析出哪些终端接入成功,哪些终端接入失败。根据终端和基站之间的状态变换,设计 RNTI 状态机如图 3 所示。

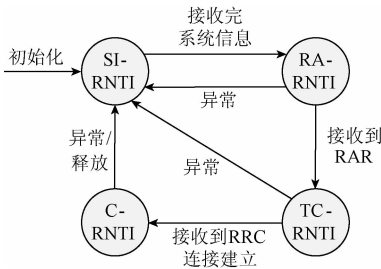


图 3 RNTI 状态机
Fig.3 RNTI state machine

首先,设计状态机处于 SI-RNTI 状态。此状态下,等待接收系统信息,主要包括主信息块(MIB)和系统信息块(SIB)。其中,SIB 的传输是通过使用 SI-RNTI 加扰的 PDCCH 调度完成的。一旦系统信息接收完毕,状态机便进入 RA-RNTI 状态。此状态下,用来等待接收消息 1 随机接入前导码和消息 2 随机接入响应。此时,消息 1 和消息 2 是以 RA-RNTI 加扰的 PDCCH 调度完成的,并且 RA-RNTI^[3]计算如下:

RA-RNTI = 1 + t_id + 10 * f_id (1)

其中,t_id 为子帧索引,0≤t_id<10;f_id 为 t_id 子帧内指定的 PRACH 索引,0≤f_id<6。

RA-RNTI 状态下接收到随机接入响应消息后,进入 TC-RNTI 状态。此状态下,用来等待接收消息 3 RRC 连接请求和消息 4 RRC 连接建立。此时,消息 3 和消息 4 是以 TC-RNTI 加扰的 PDCCH 调度完成的。

在接收到消息 4 后,TC-RNTI 才能升级为 C-RNTI,此时状态机进入 C-RNTI 状态,等待接收后续终端和基站之间的消息。

经历过这 4 种状态变换之后,空口监测仪才能正确监测到后续过程。对于因多终端同时接入,发生碰撞而导致部分终端接入失败的情况,采用在 MAC 层通过二次判决的方式,准确地监测接入成功和接入失败的终端。

一次判决,首先分析随机接入子头和对应的随机接入响应,但是对于发生碰撞的终端,此时并无法区分,因为碰撞终端采用相同的随机接入前导码进行接入,所以,碰撞终端会接收相同的随机接入响应。一次判决依据如图 4 所示。

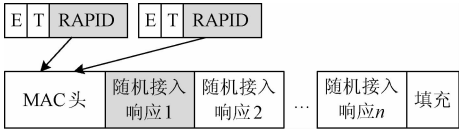


图 4 一次判决依据
Fig.4 Basis of the first judgment

二次判决,通过分析基站发送的控制单元(UE 竞争解决标识),并与终端前一次发送的 CCCH SDU 比较,相同的为接入成功,不同的为接入失败。这样,才能够正确的监测并区分出碰撞终端接入成功与否。二次判决依据,如图 5 所示。

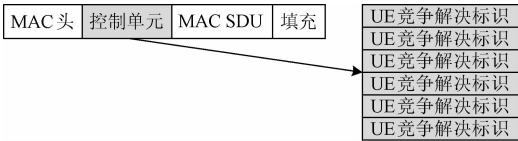


图 5 二次判决依据
Fig.5 Basis of the second judgment

2.3 空口各层 PDU 协议分析

LTE 空口协议栈各层 PDU 结构与逻辑信道、传输信道相互关联,映射关系复杂。协议栈主要包括 MAC 层、RLC 层、PDCP 层、RRC 层、NAS 层以及应用层,每一层 PDU 结构又包括控制 PDU 和数据 PDU 两大类。与 PDU 结构关联的还有下行逻辑信道、下行传输信道和下行物理信道之间的映射,以及上行逻辑信道、上行传输信道和上行物理信道之间的映射。空口协议分析模块,主要由 MAC 层协议处理模块、RLC 层协议处理模块、PDCP 层协议处理模块、RRC 层协议处理模块、NAS 层协议处理模块和应用层协议处理模块组成,如图 6 所示。

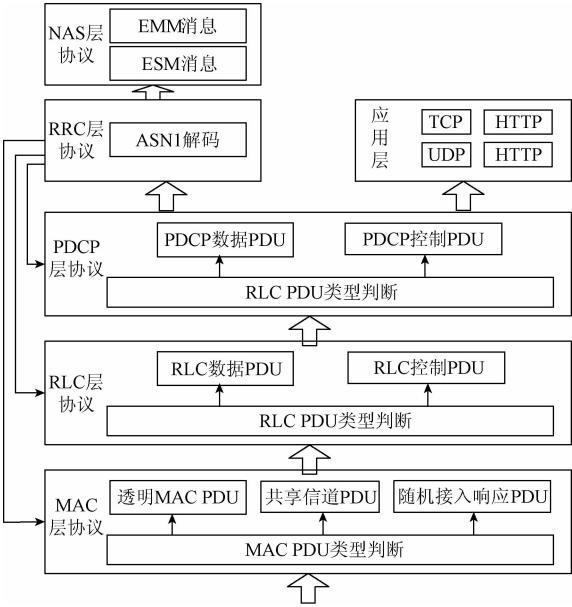


图 6 空口各层 PDU 协议分析

Fig. 6 Uu PDU protocol analysis

2.4 空口信息安全解密

目前,国际上通用的解密算法包括两种:一是先对终端和基站之间的消息进行抓取,再分别添加每一部终端 IMSI、KI 和 OP 等信息,然后才能进行解密;二是除了需要添加根密钥 K 之外,还要添加 CK、IK 和加密算法。这两种方式,不仅操作麻烦,而且需要添加参数较多,不能实现自动识别、自动解密^[12-13]。

本文设计一种解密参数自动提取、密钥自动推演、终端-密钥智能关联的方案,实现监测技术的自动解密过程。如下图 7 所示,密钥生成,CK 和 IK 分别通过 f3 和 f4 算法计算得到,用于推演 KASME,CK 和 IK 生成其中,K 为系统根密钥,RAND 通过协议分析模块解析 Authentication Request 消息获得,f3 算法用于计算加密密钥 CK,f4 算法用于计算完整性保护密钥 IK;KASME 由 CK、IK 等参数通过 KDF 推演得到,KDF 使用输入密钥 Key 对 S 进行相应计算后得到的最终的输出,作为安全各算法的输入密钥;利用加密密钥 KEY、计数器 COUNT、承载标识 BEARER ID、上下行方向 DIRECTION 和密钥流长度 LENGTH 作为解密算法输入参数,计算密钥流,与密文进行异或生成明文;利用完整性密钥 KEY、计数器 COUNT、承载标识 BEARER ID、上下行方向 DIRECTION 和消息本身作为完整性保护算法输入参数,计算完整性校验码 XMAC-I,与接收到的 MAC-I 进行比较,若一致,则认为接收到的消息是原始发送的消息;同时进行解密和完整性验证,在解密结果出来之后,并不进行解析,而是等待完整性验证结果进行判决,若,完整性验证通过,则判决通过,进行后续解析,

否则,完整性验证不通过,则判决不通过,说明本次解密无效,不再进行解析。该方案较之传统方法能够提高解密速度,节省解密时间。

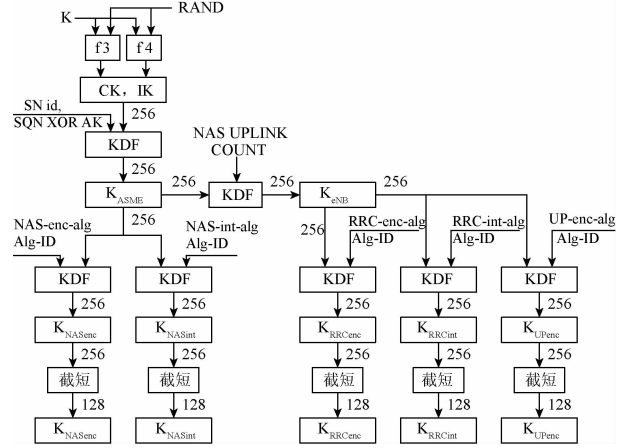


图 7 空口信息安全解密算法架构

Fig. 7 Framework of uu information security decryption algorithm

2.5 载波聚合联合调度

LTE-Advanced 载波聚合将多个传输带宽进行聚合以实现传输带宽的扩展,并且采用传输块在 MAC 层聚合的方式,尽可能地与 LTE PHY 层协议保持一致。LTE-Advanced 系统载波聚合调度方式包括非跨载波调度和跨载波调度两种^[14]。对于非跨载波调度,每个载波上发送的 PDCCH 携带的信息对应本载波的下行资源分配或上行资源分配。对于跨载波调度,则允许一个载波上的 PDCCH 调度多个载波上的无线资源,即 PDCCH 在一个载波上传输,但对应的 PDSCH 或 PUSCH 在多个载波上传输。LTE 中,终端仅工作在一个小区,只接收该小区的下行数据,而在 LTE-Advanced 载波聚合情况下,终端工作在多个小区,需要接收多个小区的下行数据进行汇聚^[15-16],因此,监测解析的复杂度和难度都明显增加。本文通过 RRC 层、MAC 层和 PHY 层的协作处理,至上而下联合协同无线资源管理,设计的载波聚合联合调度处理流程如图 8 所示。

在载波聚合中,UE 只是在 PCell 进行随机接入和附着过程,UE 进行随机接入和附着过程的小区也就是 PCell,当正常监测到 UE 随机接入和附着过程之后,需要分析接收到的 RRC 连接重配消息是否携带 SCellToAddMod-r10。配置跨载波调度是通过 RRC 连接重配消息中的 CrossCarrierSchedulingConfig-r10 配置来实现的。当 CrossCarrierSchedulingConfig-r10 中配置了 own-r10 字段时,说明当前小区配置为非跨载波调度;如果配置了 other-r10 字段,说明当前小区配置为跨载波调度。如果配置为非跨载波调度,则只需要在各自载波上监测

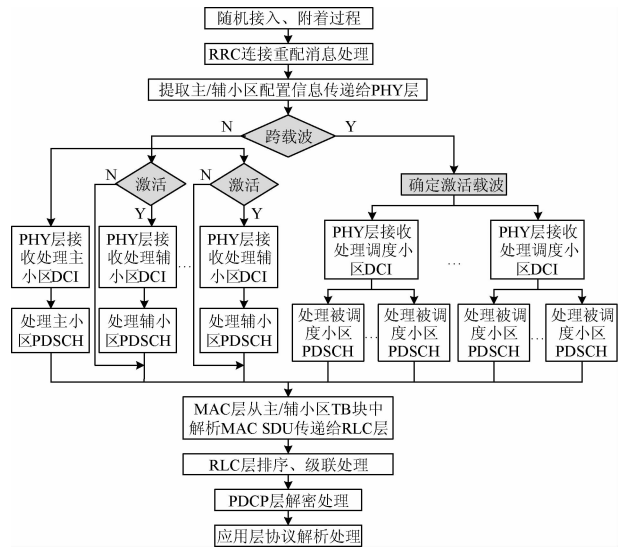


图8 载波聚合处理流程

Fig. 8 Flow chart of carrier aggregation processing

PDCCH;如果配置为跨载波调度,则需要在相应的载波上监测 PDCCH。MAC 层协议处理模块从各载波传递上来的 TB 块中解析出 MAC SDU,并将这些 MAC SDU 按照不同的 UE 进行汇聚后,传递给 RLC 层。然后,再经由 RLC 层进行排序、分段/级联处理,PDCP 层进行解密处理,应用层协议解析处理等。

2.6 基于多用户信令流的接入和释放识别

多用户信令流的接入和释放识别需要准确地解析出每个用户的上下行信令消息。通常,UE 的接入和释放是一个关联性的多次握手过程,期间会进行关键信息的请求和确认,整个流程跨度大且信令流程不固定。因此,如何从复杂的信令交互消息流中快速、有效判断出用户接入或者释放状态是空口监测与分析的一个技术难点。本文采用了一种用户状态与关键参数相关联的分析方案,如图 9 所示,其原理是直接通过前后关键消息来进行 UE 数据参数列表的维护,列表其中包括、RNTI 和 IP 值等关键参数,通过对关键参数的锁定,直接来判断出用户的状态。整个过程主要包括接入过程处理和释放过程处理两部分组成。接入过程处理是通过分析 RRC 连接请求、附着请求、附着完成消息来进行 UE 数据参数的创建和提取,而释放过程处理通过分析去附着请求、去附着完成和 RRC 连接释放消息来进行 UE 数据消息的删除和更新。

多用户信令流的接入和释放识别过程是整个行为感知过程的基本过程,它保证了对终端状态的监测和实时跟踪,以便进一步对用户业务行为给出准确的感知和反馈。通过对关键信令消息的消息内容进行解码分析可以得到相应的 UE 列表记录信息,从而生成一个 UE 记录消息列表,主要由 TMSI、RNTI 和 IP 值组成。多用户的业务

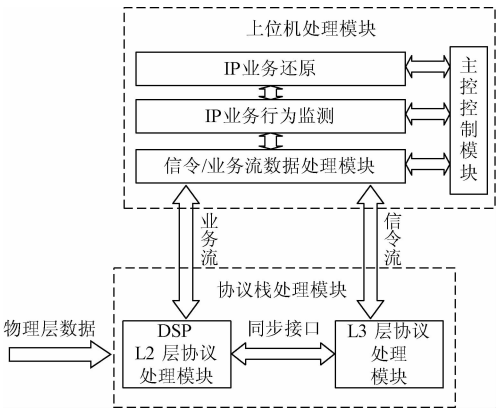


图9 多用户信令流接入与识别数据流程

Fig. 9 Flow of multi-user signaling access and indetification data

流就可以通过查询 UE 记录消息列表,进行数据流 IP 包的 UE 标识和分发处理,从而区分出每个 UE 的 IP 数据包,可以独立分析相应的数据流。

3 实验与测试结果

LTE-Advanced 空口监测与分析仪的验证测试主要包括物理层能力、协议分析功能、仪表基本功能和基本性能。

3.1 物理层能力测试

分别配置 eNodeB 系统带宽为 1.4、3、5、10、15 和 20 MHz,E-UTRAN 小区正常工作,测试终端在该小区开机进行随机接入,以 20 MHz 为例(图 10、11),仪表能够正确获取和解析 MIB 中的 dl-Bandwidth 为 n100 (20 MHz),能正确获取和解析 SIB1 信息。

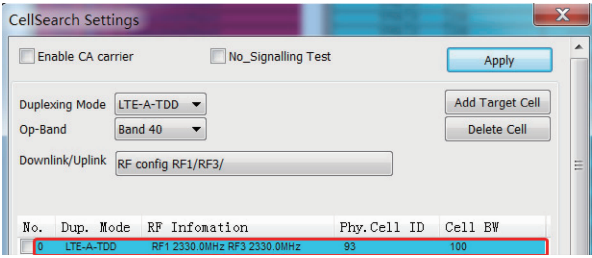


图10 20 MHz 带宽下小区搜索信息解析

Fig. 10 Analysis of cell searching message under 20 MHz bandwidth

在上行/下行配置和特殊子帧配置验证时,仪表能正确获取和解析 SIB1 中的 subframeAssignment 为 saX(图 12),specialSubframePatterns 为 sspX。在支持多天线下行传输模式 1~3 的测试验证中,通过配置 eNodeB 的传输模式,终端在该小区开机进行接入,触发 UE 进行某业

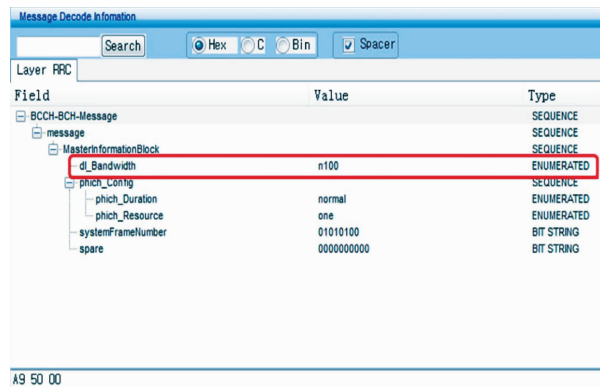


图 11 20 MHz 带宽下系统广播 MIB 消息解析

Fig. 11 Analysis of MIB message under 20 MHz bandwidth

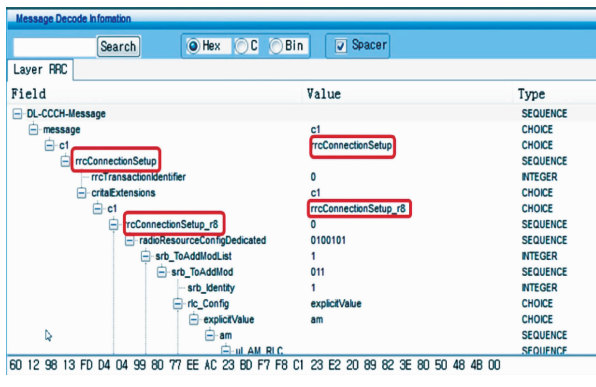


图 13 RRC 连接建立信令解析

Fig. 13 Analysis of signaling of RRC establishing

务,监测 PDSCH 采用的 MIMO 传输方式和相关信令,仪表能够正确获取和解析 RRCConnectionReconfiguration 中的 transmissionMode 为“tmX”。对于上行传输模式 2,能正确获取和解析 RRCConnectionReconfiguration 中的 transmissionModeUL 为“tm2”。

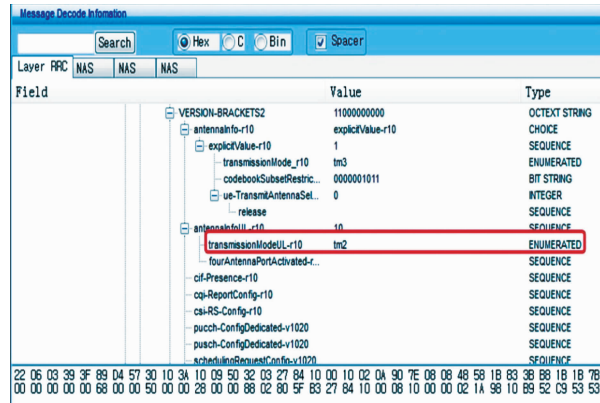


图 12 上行传输模式 2 RRC 信令消息解析

Fig. 12 Analysis of RRC signaling in the case of TM2

3.2 协议功能测试

对于系统信息广播,仪表能正确获取和解析小区系统消息 MIB、SIB1 和 SI;对于 RRC 连接建立和释放(图 13、14),仪表能够正确获取和解析 RRC 连接建立和释放消息;对于无线承载的建立,仪表能够正确获取和解析无线承载连接建立消息,以及 RRCConnectionReconfiguration 中携带 drb-ToAddModLists;对于安全模式控制验证,在 E-UTRAN 激活安全模式(加密和完整性保护)的场景下,仪表能够正确获取和解析加密/完整性保护的消息。

对于移动性管理验证,包括同频和异频切换,仪表能够完成对多小区同频和异频切换场景的监测和解析(图 15);对于 NAS 流程验证(图 16、17),包括附着和分离过程,以及 EMM 公共过程,仪表能够正确获取和解析

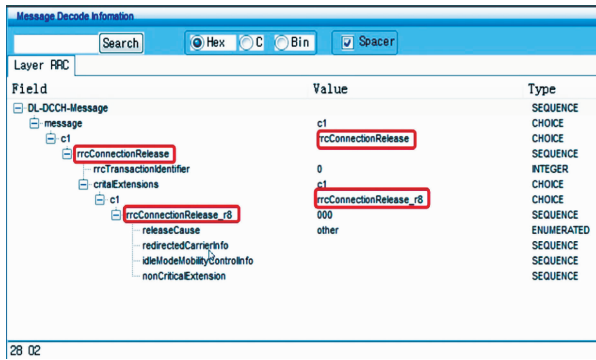


图 14 RRC 连接释放信令解析

Fig. 14 Analysis of signaling of RRC releasing

ATTACH 和 DETTACH 过程消息,能够解析身份识别、鉴权、安全模式命令等 EMM 公共过程。

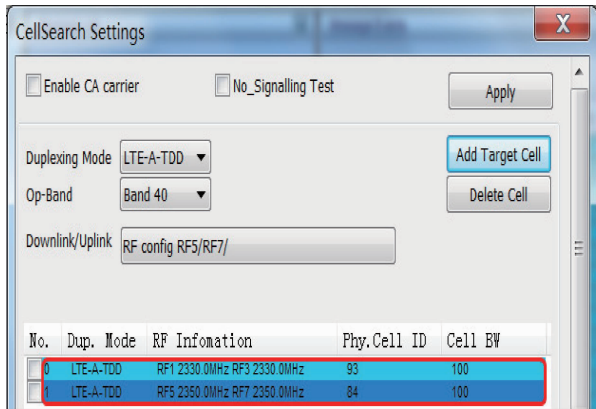


图 15 异频监测小区搜索信令解析

Fig. 15 Analysis of signaling of inter-frequency cell searching

如图 18 ~ 23 所示,载波聚合的测试包括 intra-band 和 inter-band,涵盖了 2 ~ 5 载波聚合,对于 2 ~ 3 载波聚合,仪表能够正确获取和解析 RRCConnectionReconfiguration 消息,解析对应小区的 PCI、吞吐量、MIB

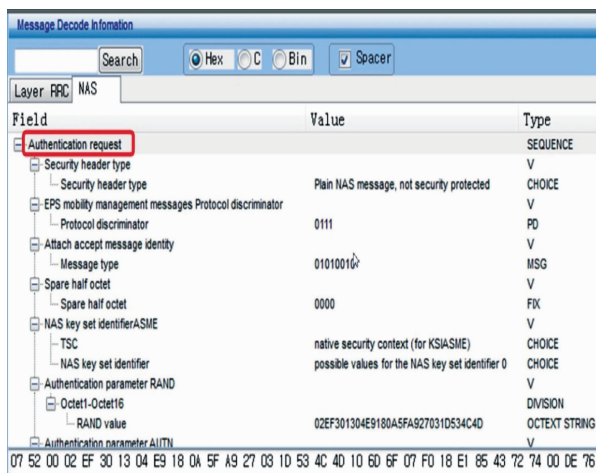


图 16 NAS 鉴权请求消息解析

Fig. 16 Analysis of NAS authentication request message

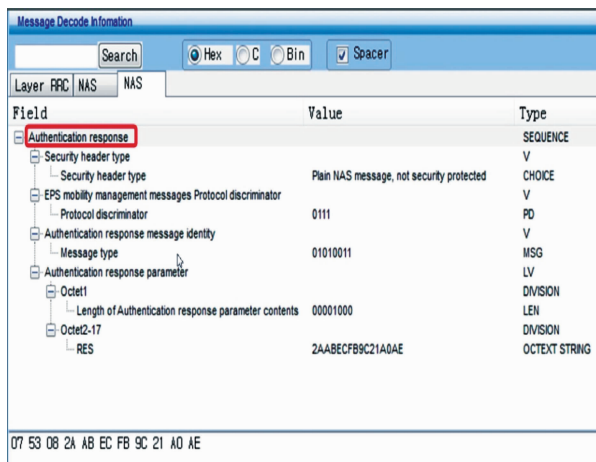


图 17 NAS 鉴权响应消息解析

Fig. 17 Analysis of NAS authentication response message

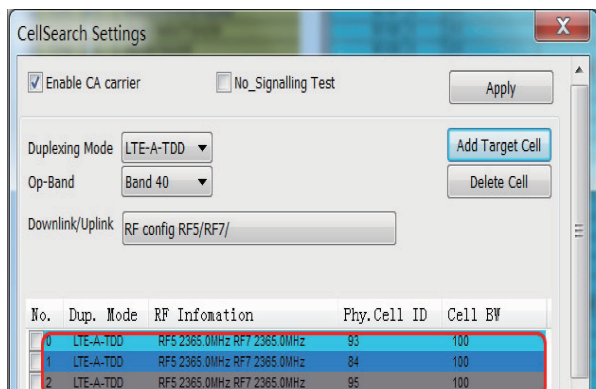


图 18 3 载波聚合小区信息解析

Fig. 18 Analysis of cell message with 3-carrier aggregation

获取和解析对应小区的 PCI 和 MIB 消息。业务分析验证包括业务类型识别、业务感知和 IP 业务解析。

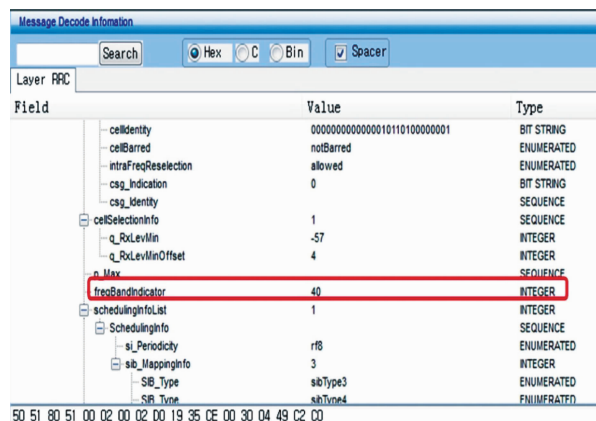


图 19 3 载波聚合广播信息解析

Fig. 19 Analysis of MIB message with 3-carrier aggregation

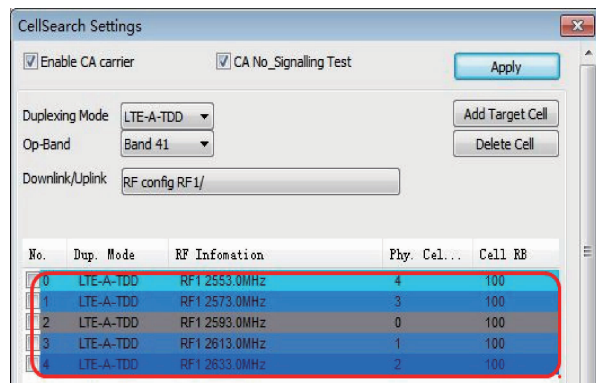


图 20 5 载波聚合小区信息解析

Fig. 20 Analysis of cell message with 5-carrier aggregation

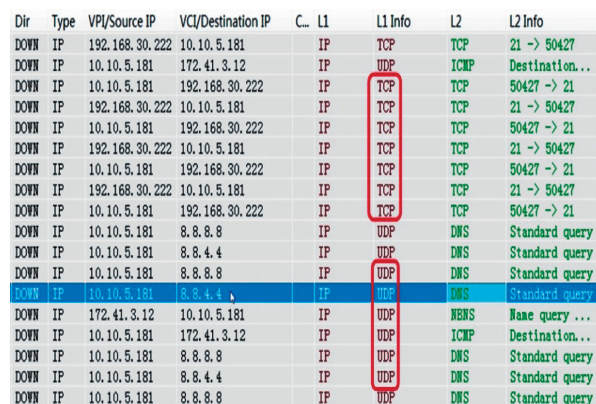


图 21 业务类型识别解析

Fig. 21 Analysis of service type identification

3.3 仪表基本功能和性能测试

如图24、25所示,仪表基本功能和基本性能测试

和 SIB1 消息,以及应用层业务数据。对于 4 和 5 载波情况,利用支持连续载波聚合的专用信号源验证,仪表能够

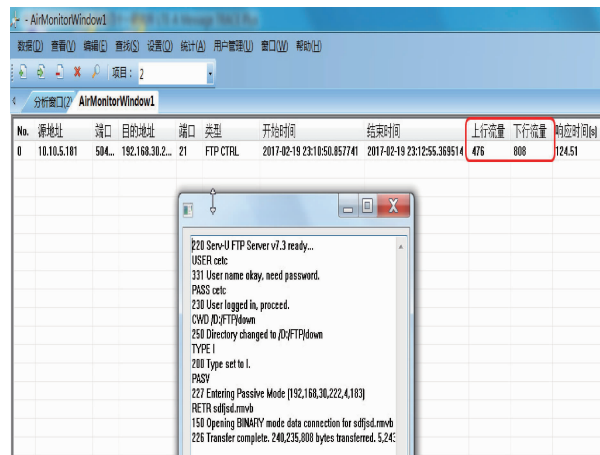


图 22 用户业务感知解析
Fig. 22 Analysis of user service-aware

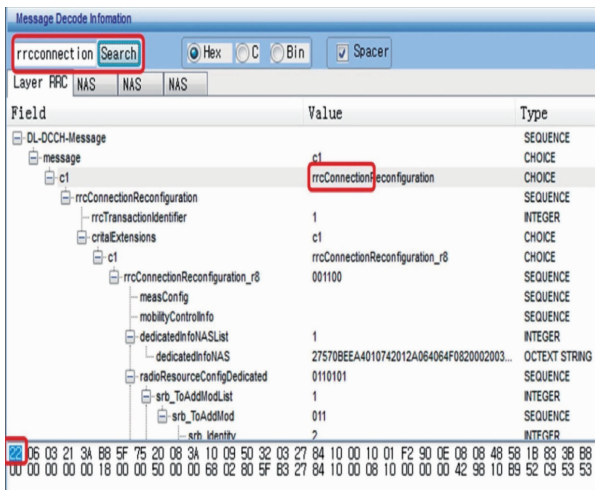


图 25 空口信令查找捕捉过滤解析
Fig. 25 Analysis of uu signaling with searching and filtering

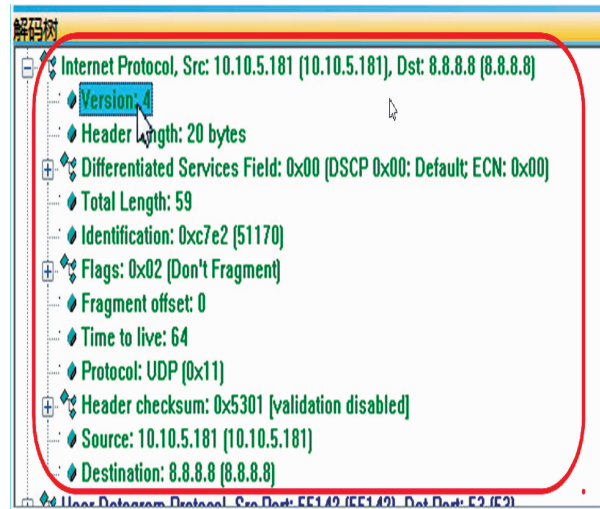


图 23 IP 业务解析
Fig. 23 Analysis of IP service

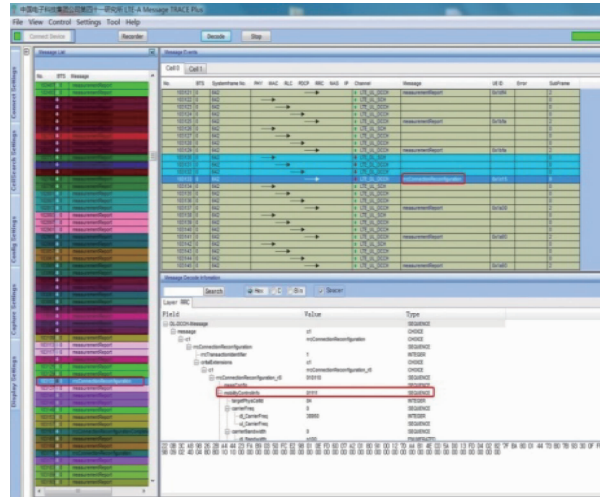


图 24 48 用户空口业务流程解析
Fig. 24 Analysis of 48-user uu service flow

证方面,对数据解码、查找、捕捉过滤和离线分析等功能,以及 48 个用户、多频段多小区同步监测进行了测试验证。能够给出 48 个终端的控制面和用户面数据,并以流程图化方式显示 48 个用户的空中接口信令流程。

4 结 论

本文构建了 LTE-Advanced 空口监测和分析仪硬件和软件平台,从多用户随机接入、空口协议分析、安全算法、载波聚合以及多用户业务行为感知等方面入手,对 LTE-Advanced 空口信息进行信号抓取和多层协议分析,并对关键流程与核心算法进行了详细设计。通过对不同状态下空口信令的实时跟踪处理和解析,在支持多层协议跨层关联分析的同时有效地降低了解析复杂度。测试和验证结果表明,在多用户随机接入、空口协议分析、安全算法、载波聚合处理,以及多用户信令流接入和释放识别等方面取得技术突破,所有过程均符合协议流程,并且与基站和终端之间实际行为完全一致。

参考文献

[1] GHOSH A, RATASTUK R, MONDAL B. LTE-advanced: Next-generation wireless broadband technology [J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 10-22.

[2] TECK H, JING Y. LTE-advanced heterogeneous networks: Release 10 and beyond [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012:6999-7003.

[3] HASELMAYR W, SCHELLANDER D, SPRINGER A. Performance evaluation of a low-complex OFDM UMTS-LTE System [C]. Vehicular Technology Conference, 2008:2142-2146.

- [4] KAUSAR R, CHEN Y. Adaptive time domain scheduling algorithm for OFDMA based LTE-advanced networks[C]. IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing IEEE Computer Society, 2011:476-482.
- [5] ELNASHAR A, EL-SAIDNY M A. Looking at LTE in practice: A performance analysis of the LTE system based on field test results [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2013, 8(3):81-92.
- [6] MADAN R, BORRAN J, SAMPATH A, et al. Cell association and interference coordination in heterogeneous LTE-A cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(9):1479-1489.
- [7] 3GPP TS 36.321 V11.6.0 Technical specification group radio access network; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Medium access control (MAC) protocol specification[S]. 2015-03.
- [8] 3GPP TS 36.323 V11.4.0 Technical specification group radio access network; Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Packet data convergence protocol (PDCP) specification [S]. 2014-09.
- [9] 3GPP TS 36.331 V11.11.0 Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Radio resource control (RRC) protocol specification[S]. 2015-03.
- [10] 3GPP TS 24.301 V10.15.0 3rd Generation partnership project; Technical specification group core network and terminals; Non-access-stratum (NAS) protocol for evolved packet system (EPS); Stage 3[S]. 2014-09.
- [11] 3GPP TS 33.401 V10.5.0 3rd Generation partnership project; Technical specification group services and system aspects; 3GPP system architecture evolution (SAE); Security architecture[S]. 2013-06.
- [12] 3GPP TS 33.102 V11.7.0 Technical specification group services and system aspects; 3G security; Security architecture[S]. 2014-12.
- [13] 3GPP TS 36.413 V10.1.0 3rd Generation partnership project; Technical specification group radio access network; Evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN); S1 application protocol (S1AP) [S]. 2011-03.
- [14] YUAN G, ZHANG X, WANG W. Carrier aggregation for LTE-A mobile communication system [J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(2):88-93.
- [15] ZHANG L, LIU F, HUANG L. Traffic load balance methods in the LTE-advanced system with carrier aggregation[C]. ICCAS, 2010:63-67.
- [16] YAN Y, LI A, HARADA A, et al. Enhanced downlink control channel resource allocation algorithm for cross-carrier scheduling in LTE-A carrier aggregation system[C]. Vehicular Technology Conference, 2011: 1-5.

作者简介



刘祖深, 1961年出生, 博士、研究员、中国电科集团首席专家, 主要研究方向为通信测试与前沿关键技术研究。

E-mail: lzs@ei41.com

Liu Zushen was born in 1961, Ph. D., he is a researcher and the chief expert of CETC. The main research direction is communication test and frontierkey techniques.



张煜, 1980年出生, 高级工程师, 中国电科41所移动通信技术带头人, 主要研究方向为无线移动通信测试技术研究。

E-mail: eibb@ei41.com

Zhang Yu was born in 1980, senior engineer. He is the academic leader of CETC 41 communication test. The main research direction is communication test.