

高清视频会议系统在辽宁气象服务中的应用^①



张元龙, 赵威, 陈雨, 张旭阳, 王帅

(辽宁省气象信息中心, 沈阳 110166)

通讯作者: 张元龙, E-mail: 270902714@qq.com

摘要: 基于辽宁气象宽带广域网络, 建立辽宁省气象部门高清视频会议系统. 该系统遵循先进性、标准化、安全可靠、灵活扩展、易操作的原则, 以省级控制中心为节点, 具备高清视频会议收听收看、转发及录制的功能, 在辽宁气象服务体系中得到广泛应用. 本文对辽宁气象高清视频会议系统架构、系统组成以及实现该系统视音频功能的关键技术进行了分析, 同时结合业务发展需要, 新建移动终端视频会议接入系统, 最后以我省高清视频会议系统的音频故障为例, 创建音频故障树, 运用故障树分析法对该系统音频的稳定性进行了定量和定性分析.

关键词: 高清视频会议系统; 气象服务; 关键技术; 故障树; 定性分析

引用格式: 张元龙, 赵威, 陈雨, 张旭阳, 王帅. 高清视频会议系统在辽宁气象服务中的应用. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 112-118. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7258.html>

Application of HD Video Conference System in Liaoning Meteorological Service

ZHANG Yuan-Long, ZHAO Wei, CHEN Yu, ZHANG Xu-Yang, WANG Shuai

(Meteorological Information Center of Liaoning Province, Shenyang 110166, China)

Abstract: Based on Liaoning meteorological broadband wide area network, the HD video conference system of Liaoning Meteorological Department was established. The system follows the principle of advanced, standardized, safe and reliable, flexible expansion and easy operation, takes the provincial control center as the node, and has the function of high-definition video conference listening, watching, forwarding, and recording, which has been widely used in Liaoning meteorological service system. In this study, the Liaoning meteorological high-definition video conferencing system architecture, system composition, and key technologies to realize the system audio function are analyzed. At the same time, combined with the needs of business development, the new access system of mobile terminal video conference was set up. Finally, taking the audio fault of Liaoning Province HD video conference system as an example, the audio fault tree is established, and the audio stability of the system is quantitatively and qualitatively analyzed by using the fault tree analysis method.

Key words: HD video conference system; meteorological service; key technologies; fault tree; qualitative analysis

多媒体通信技术的快速发展, 传统的文字和语音的交流方式正在因科学技术的发展而发生着巨大的变化, 人类的生产生活与声音和图像的传递越来越密切. 而高清视频会议系统能够实现声音和图像的实时远距离传输, 已经发展成为不可或缺的沟通和交流方式, 为人们提供一种简单、快捷、高效的异地交流的手段, 更

接近于面对面交流的真实体验^[1].

高清视频会议系统在气象部门发挥着越发重要的业务应用位置, 是气象部门防灾减灾、提高天气预报准确率和提高工作效率的有力支撑. 近些年来, 气候变化和气象灾害对社会和经济发展的影响越来越大, 气象服务的深度和广度也逐渐增大, 人们对高质量气象

① 收稿时间: 2019-06-29; 修改时间: 2019-07-23; 采用时间: 2019-07-26; csa 在线出版时间: 2019-12-27

服务的需求急剧上升,更加需要高质量的业务服务支撑体系,以更好的服务社会.目前气象科技服务已延伸至交通、旅游、航空、水利、农业、军事等多个行业和领域^[2].

随着业务的发展需要和先进技术的引进,高清视频会议系统设备体系更加庞大复杂,出现问题的几率不断加大,同时也增加了日常维护的难度.本文对辽宁气象高清视频会议系统架构、系统组成以及实现该系统视音频功能的关键技术进行了分析,同时结合业务发展需要,新建移动终端视频会议接入系统,最后以我省高清视频会议系统的音频故障为例,创建音频故障树,运用故障树分析法对该系统音频的稳定性进行了定量和定性分析.

1 系统构成

辽宁省气象局的高清视频会议系统是基于多媒体通信技术,以辽宁省气象信息中心视频会议操控台为控制中心,覆盖全省14个市气象局、65个县气象局,以及环保局、沈阳农业大学、水利厅等同城用户,具备实时传输视频、音频和发言主机辅流信号的功能.该系统是建立在集团广域网内部的应用^[3],承载着天气预报会商业务交流、区域气候会议、气象应急服务、远程教育培训以及其他国家级、省级的临时电视电话会议等业务,尤其在每年汛期、重大灾害性天气过程中以及气象应急保障中发挥巨大作用.图1是辽宁省气象局高清视频会议系统架构图,该系统由省级控制中心主控,由7个省级分会场、4个同城用户分会场、14个市级分会场以及局机关会场组成.基于IP网络,采用高清视频会议终端背靠背转播、MCU逐级级联(即市级MCU呼入省级MCU,县级终端呼入所在市级MCU)的方式,能够实现对中国气象局组织召开各类视频会议进行收听、收看和转发功能,同时也能够召开全省省-市-县三级的高清视频会议,实现实时不同会场之间多媒体数据流双向互通.该系统全年365天不间断运行,目前已建成全省的省-市-县三级高清视频会议系统,可以提供高清1080P@60F的视频图像.

1.1 省级控制中心

省级控制中心由两台互为冷备的华为ViewPoint 8650多点控制单元(Multipoint Control Unit, MCU)、两台背靠背连接的转会终端、一台配有会议管理平台的服务器、抓包服务器、录播服务器、电视墙服务

器、大屏拼接处理器,一台光纤矩阵共同组成.会议管理平台服务器负责召集、管理及结束等会议管理控制功能,实现系统资源统一调度;MCU主要负责不同会场之间码流的处理和转发,具有超强的组网能力和强大的动态速率、协议适配能力,实现不同会场之间多媒体数据流的交互,其最大接入带宽达到512 MB,支持1080 P分辨率的视频码流以及最高8 MB的会议带宽;背靠背连接的转会终端,可以将国家级召开的视频会议转发给省级其他会场以及市县级会场收听收看;抓包服务器负责抓取省内(省级会场和市级会场)分会场的主流画面,便于监控各分会场的主流画面信息;电视墙服务器和拼接屏处理器负责电视墙图像的处理和显示;录播服务器对召开的会议进行实时录制;光纤矩阵负责不同的视频信号之间的切换.

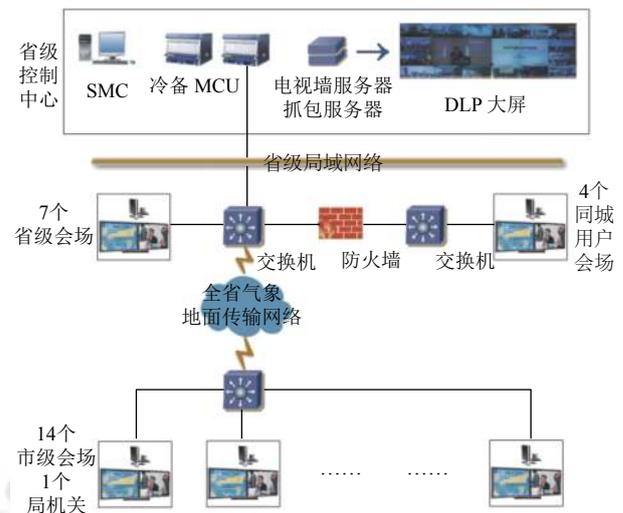


图1 辽宁省气象局高清视频会议系统架构图

1.2 各级分会场

省级分会场主要有两台背靠背转会终端,4个直属单位视频终端以及一个会议室视频终端组成;同城用户分会场由环保局、农业大学等4个单位组成;在各市级分会场分别配有满足其会议能力的MCU,负责管理所管辖县局的视频终端,具备同省级进行MCU逐级级联召开会议的能力^[4].局机关分会场由5个视频终端组成.在召开视频会议时,各分会场的视频终端基于IP网络通过局域网或广域网呼入省级控制中心MCU,各会场之间的音频、视频及双流信号通过视频终端编解码后,使其在网络中传输至省级MCU进行转发处理.

1.3 移动视频会议系统

在应急气象服务中,如何能够及时、准确获得突发事件现场的实时情况,是需要急需解决的问题.近些年来,3G、4G通信技术迅速发展,其网络传输带宽逐渐加大,流量资费逐渐降低,如果能够依靠3G、4G网络信号,将突发事件现场的灾害情况及时反馈到省级会场,这将大大增加我们在应急事件处理中的主动性.图2是辽宁气象移动终端接入视频组网连接架构图.该系统主要由融合服务器(RPRM和DMA)、智能移动终端RPM、互联网接入网关RPAD以及一台POLYCOM MCU设备组成.

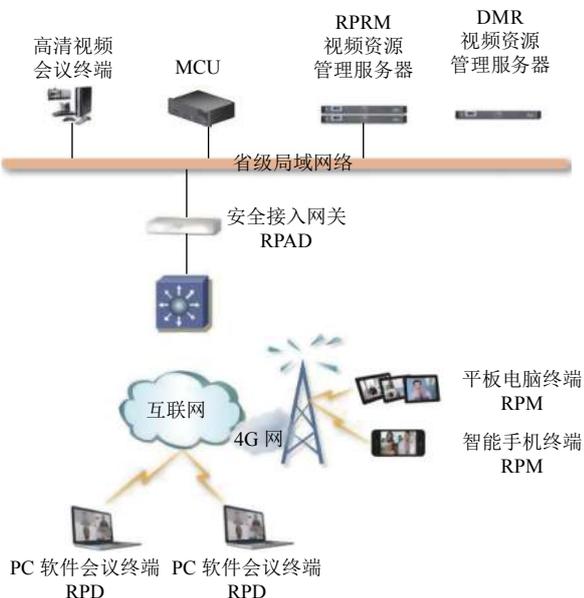


图2 辽宁气象移动终端接入视频组网连接架构图

省级控制中心利用融合服务器来集中配置、监视和管理整个视频协作网络,该服务器支持GK和SIP server功能;安全接入网关是内外网络穿越系统,支持H.323和SIP协议;智能移动终端RPM安装POLYCOM手机终端软件.当应急服务现场具有3G、4G或WiFi无线网络信号时,省级MCU 8650与POLYCOM MCU级联,RPM利用省级操控中心下发的用户名和密码,通过RPAN即可将应急服务现场的画面实时传输至POLYCOM MCU,进而可以在省级控制中心大屏显示,不仅有利于值班领导能够第一时间获得应急服务现场的信息,更加有利于领导根据现场的实时情况做出重要批示,增加我们在应急事件处理中的主动性.

1.4 省级控制中心音视频功能的实现

省级控制中心具备处理、中转传输和切换与会会场之间音频、主流信号和辅流信号的功能.系统的主流信号采集部分采用70寸4×6大屏显示系统用于会议调度和主流画面监控显示,配有一台48×48的光纤矩阵用于视频信号的切换显示,同时配有对与会会场主流信号数据流进行抓取的抓包服务器,抓取MCU中参会会场的主流画面;值班员通过中控主机对光纤矩阵的输入、输出信号进行控制切换,进而将与会场的主流视频信号投放在大屏显示系统中显示.系统的音频部分利用调音控制台将会场的多路输入信号进行放大、混合、分配和音响效果加工,调音控制台的声音输出一部分回传给视频会议终端,另一部分声音输出到两台数字音频处理器,数字音频处理器的另一端外接8个功放,供省级控制中心音频扩音.

2 关键性技术应用

随着互联网带宽的增加以及多媒体处理技术的发展^[5],视频会议变得越来越吸引人,高清视频会议已经成为主流.我省的视频会议系统遵循国际标准和国内外有关编码规范要求,满足先进性、标准化、安全可靠、灵活扩展、易操作的设计原则^[6],是一种基于IP分组交换网络召开会议的方式,它不仅能够实时传递与会代表之间的声音和图像,而且还可以传递文件和图表等信息^[7],它是将音频、主流和辅流信号在IP网络中进行转发.因此,整个视频会议系统涉及到视频、音频和图像处理等技术,以及在通信系统中应该遵循的协议和标准.

2.1 通信标准

在分组交换网络中,H.323和SIP是当前应用最广泛的两种多媒体会话信令协议^[8].早在1996年ITU-T(国际电信联盟)就通过了H.323协议^[9],它是集音频、视频、媒体终端控制及数据应用等几方面协议组成的一组协议集,H.323发展至今在与传统电信体系互联、互通方面技术发展比较成熟,应用也很广泛^[10,11].基于H.323协议的多媒体通信系统由终端、网关、网守以及多点控制单元(MCU)等不同的角色组成,体现了一种集中式、富有层次式的控制模式,其中多点控制单元(MCU)主要负责视频会议中众多参与者之间视频、音频和数据流的分发和处理^[5],网守主要完成呼叫的控制、媒体传输控制功能等.而SIP协议标准是

由 IETF (因特网工程任务组) 在 1999 年推出的, 它不需要大量的协议配合就能控制现有的网络协议实现多媒体互通, 它采用 Client/Server 结构的消息机制, 在风格上遵循简练、开方、兼容和可扩展的原则, 体现出一种分布式分控制模式. SIP 协议最大的优点是简单; 和 SIP 协议相比, H.323 在可靠性方面支持中间实体故障处理的能力, 在服务质量方面支持视频终端的集中管理和控制的功能, 而不是依赖于别的协议; 同时, 结合我省业务的运行实际情况, 辽宁气象高清视频会议系统是一个大型的会议系统, 需要集中管理和控制, 因此辽宁高清视频会议系统采用 H.323 通信标准.

2.2 图像编码技术

在高清视频会议系统中, 如何选取适合的视频编解码技术标准是非常关键的. 当前比较主流的视频编解码技术标准有 H.265、H.264、H.263、MPEG-4 和 MPEG-2 等, 都是基于块的混合编码^[12]. H.265 是目前最新的视频编解码标准, 相比于其他的视频编码标准, H.265 明显改善了视频压缩效率^[13], 针对其更高的计算复杂度, 提出了帧内预测硬件加速算法^[13,14]. H.264 同其他三种视频编解码技术标准相比, 基本功能没有变化, 但是在运动补偿方面通过率失真优化来选择不同的块尺寸改善运动精度 (可以达到 1/4 像素的精度), 提高图像质量和编码效率; 帧内预测是用邻近块的相关

性预测当前块和实际块的残差被编码, 以消除空间冗余; H.264 编码视频流与 H.263 或 MPEG-4 编码视频流相比, 平均可节省 39% 的比特率^[15]. 通过对比以上几种视频编解码技术标准, 在编码效率上 H.264 算法最领先^[16], 并且在较低的带宽条件下就可以保证视频的传输质量, 这也是我省高清视频会议系统目前所采用的视频压缩技术标准.

ISO (国际标准化组织) 与 ITU-T (国际电信联盟) 等组织在 2010 年成立了联合组织, 就数字视频压缩技术 H.264 的某些技术进行了升级, 提出了 H.265, 其宗旨是只需要消耗原来的一半带宽即可获得同质量的视频^[17]. 在 2013 年 2 月, ITU 正式通过了 HEVC/H.265 (高效视频编码, High Efficiency Video Coding) 标准, 图 3 是 Grois 等^[18]对 H.265/MPEG-HEVC, VP9 和 H.264/MPEG-AV-C 编码器性能 (两种不同的应用场景进行对比, 两种场景的画面分辨率分别是 2560×1600, 30 fps 和 1920×1080, 24 fps) 进行的对比分析, 发现 H.265 编码器的效率更高, 在较低的带宽下即可获得同等的视频质量. 从 H.264 向 H.265 升级是信息技术和时代发展已经成为一种必然趋势, 比如现在已经出现的 4K 电视、HUAWEI TX50 等终端产品已经支持 H.265 技术标准, 它提供给用户无可比你的音视频效果, 带去更加优质的视频会议体验.

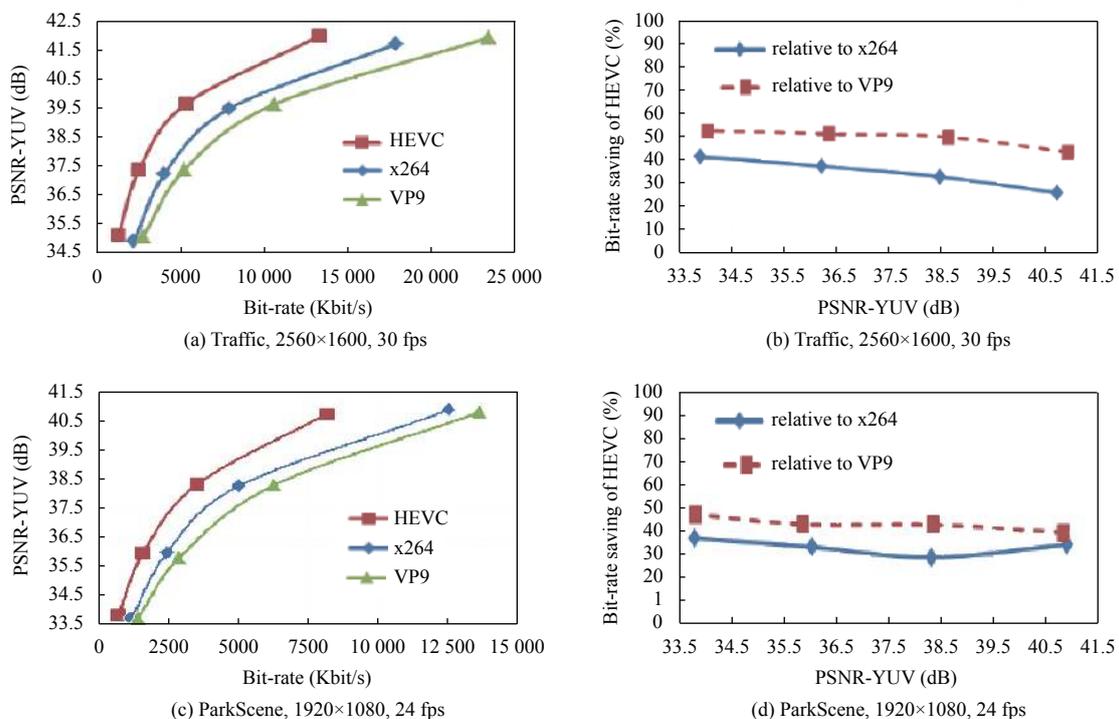


图 3 H.265/MPEG-HEVC, VP9 和 H.264/MPEG-AVC 编码器性能对比分析^[18]

2.3 音频标准

针对高清视频会议系统, 保证视频、音频以及图像的传输质量是十分重要的. 有人会说视频比较重要, 其实视频会议中, 我认为音频的传输质量更重要. 在一次视频会议中, 与会者之间的交流主要是通过音频对话实现的, 因此, 音频的编解码和传输保障是多媒体关键技术的重要特征之一. 表1是不同的音频编解码器性能对比分析表. 我省视频会议系统MCU采用的音频协议是G.722-64 k, 目前完全可以满足当前业务的需求. G.722音频协议采用16 kHz的音频采样频率, 7 kHz频宽, 48、56和64 kbit/s三种传输速率, 其延时和误码率低, 质量较好, 音质可达到调幅广播音质.

表1 不同的音频编解码器性能对比分析

编解码器	采样率 (kHz)	频宽 (Hz)	码率 (kb/s)	音质	最低算法延迟 (ms)
G.711	8	0.3 k~3.4 k	64	低	1
G.722	16	50~7 k	64	中	3
G.728	8	4000	16	低	0.625
AAC_LD	48	20~20 k	48~64	高	20

人耳所能感知的自然界的频响能力可以达到20 Hz~20 kHz, 由于G.711, G.722和G.728等音频标准的频宽限制, 在对视频会议现场音频的还原过程中过多的音频信息的丢失造成了无法真实还原会议现场的情况, 对音频质量影响最大的是丢包率, 时延和抖动. 为了解决以上问题, AAC_LD (Advanced Audio Coding Low Delay, 高级音频编码低延迟规格) 音频标准的诞生, 其低带宽、低延迟和高质量的特点使高清视频会议过程中的音频更加近于完美, 能够达到高保真CD音质.

3 系统稳定性分析

高清视频会议系统在气象服务体系中扮演着不可或缺的重要角色, 且该统设备较多, 可能的故障点和种类多, 因此保证该系统的稳定运行至关重要. 而故障树分析法, 简称FTA (Fault Tree Analysis), 它是由贝尔电话实验室的H.A.Watson在1961年提出的, 是一种分析、判断系统的可靠性和可用性的重要方法, 它是一种特殊的倒立树状逻辑因果关系图, 是故障事件在一定的条件下发生的逻辑规律, 能够清晰的说明系统是怎样失效的^[19], 反映出系统发生故障这一事件的各种直接原因和间接原因, 故障树分析法在油气管道传

输^[20]、评估电力系统的稳定性^[21,22]方面有很多的应用. 接下来以我省高清视频会议系统的音频信号故障为例, 运用故障树分析法, 对该系统音频信号的稳定性进行定性和定量的分析.

3.1 故障树的建立

对高清视频会议系统的组成原理和故障特点了解的越充分, 越有利于故障树的建立. 我省高清视频会议系统主要是基于传输宽带网络, 通过MCU、视频终端、光纤矩阵、电视墙服务器和DLP拼接屏处理器等硬件设备, 将不同会场之间的多媒体信息流进行交互的. 视频会议系统中的多媒体信息流包括视频(本文指辅流信号)和音频信号两个部分, 与视频信号相比较, 音频信号可以为与会者提供更好的交流互动平台, 更加有利于表述己方的观点. 因此, 我们以视频会议系统的音频信号故障为例进行故障树分析, 将音频信号故障作为故障树的顶事件, 根据我省视频会议系统架构的实际情况, 构建我省视频会议系统音频信号故障树如图4所示, 其中声音故障作为该故障树的顶事件, 找出导致顶事件发生的全部可能原因即中间事件, 再找出导致中间事件发生的全部可能原因即底事件.

3.2 故障树的定性分析

对故障树进行定性分析, 主要是寻找故障树的全部最小割集, 找到最小割集能够全面了解系统相应故障发生的各种可能情况, 了解系统正常运行的可靠性大小, 同时也可以为故障预防和处理提供依据. 本文采用上行法进行分析, 即从最末的底事件一级起, 继而将上一级中的事件用最末一级的事件和本级中的有关的基本事件表示, 如此向上运算, 直到最上一级. 在图4中, 各事件相互独立, 都有或门构成, 顶事件用 T 表示, 按照该原则, 便可得到整个故障树顶事件、中间事件和底事件之间的表达式如式(1)~式(6)所示:

$$T = G1 + G2 + G3 + G4 \quad (1)$$

$$G1 = S1 + R1 + S4 \quad (2)$$

$$G2 = S5 + R1 + S6 \quad (3)$$

$$G3 = S7 + S8 \quad (4)$$

$$G4 = S9 + S10 + S11 \quad (5)$$

$$R1 = S2 + S3 \quad (6)$$

利用式(1)~式(6)的进一步推算, 即可得出式(7), 如下所示:

$$T = S1 + S2 + S3 + S4 + S5 + S6 + S7 + S8 + S9 + S10 + S11 \quad (7)$$

从式 (7) 可以看出, 该故障树的最小割集为 {S1}, {S2}, {S3}, {S4}, {S5}, {S6}, {S7}, {S8}, {S9}, {S10},

{S11}, 并且最小割集均为一阶, 说明一个底事件发生就可以引起顶事件发生, 故障发生的可能性比较大。

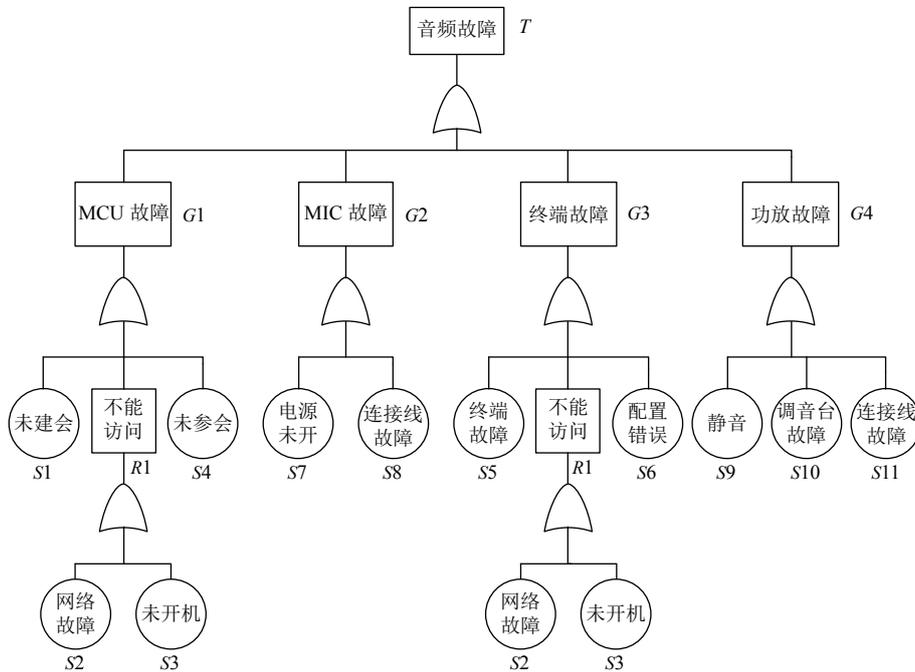


图4 我省视频会议系统音频信号故障树

3.3 故障树的定量分析

故障树的定量分析就是对该系统进行量化分析, 分析不同最小割集的重要程度, 同时可以间接估算顶事件发生的概率. 最小割集之间相互独立, 顶事件发生的概率公式如式 (8) 所示:

$$P_T = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{S_i}) \quad (8)$$

其中, P_T 是顶事件发生的概率, P_{S_i} 是最小割集发生的概率, $\prod_{i=1}^n (1 - P_{S_i})$ 为最小割集均不发生的概率乘积, n 为最小割集的个数. 假设图 4 中各个底事件发生概率均为 0.01, 则该系统故障树顶事件发生的概率 $P_T = 0.105$. 但是实际上音频发生故障原因的基本事件发生的概率是不同的, 发生概率比较高的事件是 {S8} 和 {S9}, 即连接 MIC 的接线松动和不经意碰到中控主机致使功放静音, 导致故障树顶事件的发生, 假设这两次事件发生的概率为 0.02, 则顶事件发生的概率 $P_T = 0.123$, 顶事件发生的概率增加了, 所以这两点可作为日常处理音频故障检查的重点, 有利于更有效的减少故障率.

4 结术语

辽宁省级高清视频会议系统在气象服务体系中发

挥着至关重要的作用, 该系统已经成为我省气象部门防灾减灾、提高天气预报准确率和提高气象服务质量的有力支撑. 该系统依托全国及全省气象广域网络, 承担国家级及全省级的各类技术培训、异地交流以及行政会议等工作, 不但减少了工作人员的舟车劳顿, 还有利于提高了工作效率. 同时, 我省新建的移动终端接入视频组网系统, 使得在应急气象服务中更加灵活、便捷的了解灾害现场的实时情况, 有利于领导决策、部署下一步工作任务提供依据. 此外, 对我省高清视频会议系统整体架构分析, 深入探讨视音频的技术标准, 并以该系统的音频信号故障为例, 运用故障树分析法对我省高清视频会议系统的音频故障进行了定性和定量的分析, 这不仅增加我们对该系统更深层次的了解, 还为今后故障应急和处理打下了坚实的基础, 进而有利于减少音频故障.

参考文献

- 柳春, 廉东本. H.264 编解码算法在视频会议中的应用. 计算机系统应用, 2015, 24(4): 144-147. [doi: 10.3969/j.issn.1003-3254.2015.04.025]
- 梁小雨, 陈永涛, 黄珣, 等. 多媒体通信技术在中国气象服

- 务体系中的应用. 气象与环境学报, 2014, 30(1): 108–112. [doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2014.01.017]
- 3 韩纬杰, 施元超, 陈玲玲. 高清视频会议系统设计. 计算机系统应用, 2018, 27(4): 82–87. [doi: 10.3969/j.issn.1008-1151.2016.03.002]
- 4 张青. 视频会议系统在气象部门的应用和拓展. 辽宁气象, 2005, (4): 37.
- 5 Willebeek-LeMair MH, Kandlur DD, Shae ZY. On multipoint control units for videoconferencing. Proceedings of 19th Conference on Local Computer Networks. Minneapolis, MN, USA. 1994. 356–364. [doi: 10.1109/LCN.1994.386585.]
- 6 詹利群, 任晓炜. 基于 H.323 的气象视频电视会商系统设计与实现. 计算机系统应用, 2009, 18(1): 69–71, 75. [doi: 10.3969/j.issn.1003-3254.2009.01.018]
- 7 肖进胜, 沈燕飞, 徐正全, 等. 视频会议中的多画面码流合成的研究与实现. 计算机应用研究, 2005, 22(1): 255–257, 260. [doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2005.01.085.]
- 8 闭彬煊. SIP 与 H.323 在 Internet 电话信令方面的比较. 广西交通科技, 2000, 25(S1): 155–159.
- 9 范元隆, 蔡旖旎. SIP 与 H.323 协议的比较. 上海应用技术学院学报, 2008, 8(4): 297–301.
- 10 Abler R, Wells G. Supporting H.323 video and voice in an enterprise network. Proceedings of the 1st Conference on Conference on Network Administration. Santa Clara, CA, USA. 1999. 3.
- 11 Lin CW, Wang WH, Sun MT, *et al.* Implementation of H.323 multipoint video conference systems with personal presence control. Proceedings of 2000 Digest of Technical Papers. International Conference on Consumer Electronics. Nineteenth in the Series (Cat. No.00CH37102). Los Angeles, CA, USA. 2000. 108–109. [doi: 10.1109/ICCE.2000.854518.]
- 12 王嵩, 薛全, 张颖, 等. H.264 视频编码新标准及性能分析. 电视技术, 2003, (6): 25–27. [doi: 10.3969/j.issn.1002-8692.2003.06.008]
- 13 李文武, 孙书为, 郭阳. 基于梯度的 H.265/HEVC 帧内预测硬件加速算法研究. 计算机工程与科学, 2019, 41(4): 575–582. [doi: 10.3969/j.issn.1007-130X.2019.04.001]
- 14 Jiang XT, Feng J, Song T, *et al.* Low-complexity and hardware-friendly H.265/HEVC encoder for vehicular Ad-Hoc networks. Sensors, 2019, 19(8): 1927. [doi: 10.3390/s19081927.]
- 15 楼剑, 陆亮, 虞露, 等. H.264 标准的特点及其改进研究. 电视技术, 2003, (6): 13–15. [doi: 10.3969/j.issn.1002-8692.2003.06.004]
- 16 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准—H.264/AVC. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- 17 徐剑烈. H.264 向 H.265 的数字视频压缩技术升级研究. 数字通信世界, 2017, (7): 6, 16.
- 18 Grois D, Marpe D, Mulyoff A, *et al.* Performance comparison of H.265/MPEG-HEVC, VP9, and H.264/MPEG-AVC encoders. Proceedings of 2013 Picture Coding Symposium (PCS). San Jose, CA, USA. 2013. 394–397. [doi: 10.1109/PCS.2013.6737766.]
- 19 魏选平, 卞树檀. 故障树分析法及其在应用. 电子产品可靠性与环境试验, 2004, (3): 43–45. [doi: 10.3969/j.issn.1672-5468.2004.03.009]
- 20 Dong YH, Yu DT. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(2): 83–88. [doi: 10.1016/j.jlp.2004.12.003.]
- 21 韩小涛, 尹项根, 张哲. 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用. 电网技术, 2004, 28(1): 56–59. [doi: 10.3321/j.issn:1000-3673.2004.01.014]
- 22 Volkanovski A, Čepin M, Mavko B. Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(6): 1116–1127. [doi: 10.1016/j.res.2009.01.004.]