

基于DTMB-A的8K超高清数字电视传输系统

黄云川¹,张超^{1,3,4},潘长勇^{2,3,4},李思远⁵,李熏春⁶

(1.清华大学电子工程系,北京100084;2.北京信息科学与技术国家研究中心,北京100084;3.鹏城实验室,深圳518040;4.深圳清华大学研究院,深圳518057;5.北京数字电视国家工程实验室,北京100191;6.国家广播电视总局广播电视科学研究院,北京100866)

摘要:本文提出一种8K超高清地面数字电视传输系统。该系统基于国际上现行的地面数字电视多媒体广播演进标准(DTMB-A),采用双天线极化、信道绑定等技术来提高数据传输率,可支持8K超高清视频传输灵活高效的业务需求。经过硬件实现和测试,本系统在实验室测试和外场试验中均取得了理想效果:双天线极化方案的正交极化隔离度可达到约22 dB,系统最高可支持100Mbps的有效数据率;进一步,采用4路信道绑定方案的传输速率最高可达到200 Mbps,该方案在深圳进行的外场试验中实现了国内首次基于地面数字电视无线广播的8K超高清视频直播。上述分析和测试结果验证了本文所提方案的有效性。

关键词:DTMB-A;8K超高清数字电视;双天线极化;信道绑定

中图分类号:TN934 文献标识码:A 文章编号:1673-4793(2022)01-0001-07

The 8K ultra-high definition digital television transmission system based on DTMB-A

HUANG Yunchuan¹, ZHANG Chao^{1,3,4}, PAN Changyong^{2,3,4}, LI Siyuan⁵, LI Xunchun⁶

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;
3. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518040, China;
4. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;
5. National Engineering Lab For DTV (Beijing), Beijing 100191, China;
6. Academy of Broadcasting Science, NRTA, Beijing 100866, China)

Abstract: This paper presents an 8K ultra-high definition terrestrial digital television transmission system. Based on the DTMB-A standard widely used in the worldwide, the system could adopt dual cross-polarization antennas or channel bonding schemes to support flexible and efficient services of 8K UHD video transmission. The system has achieved satisfactory results in indoor and field trials after hardware implementation and tests, where the cross-polarization isolation (XPI) in cross-polarization scheme can reach up to about 22 dB, the system can support the effective data transmission rate of 100Mbps, and the maximum transmission rate of the channel bonding scheme can be up to 200 Mbps. Furthermore, the 8K live broadcast system was realized for the first time in China based on digital terrestrial television broadcasting in Shenzhen which uses four channels bonding technology. A series of analysis and test results could indicate the effectiveness of the proposed system.

Key words: DTMB-A; 8K-UHD television; dual polarization; channel bonding.

基金项目:鹏城实验室项目(PCL2021A10);深圳市科技项目(JSGG20201103095805015)

作者简介:黄云川,清华大学硕士研究生,研究领域为无线通信。E-mail:hyc20@mails.tsinghua.edu.cn;张超,清华大学副教授,从事无线通信和电力线通信的研究;潘长勇,清华大学教授,长期从事宽带无线传输领域的科研与教学工作;李思远,数字电视国家工程实验室系统工程师,从事无线宽带传输和高清视频传输系统集成测试;李熏春,教授级高级工程师,研究领域为广播与网络覆盖的规划与优化。

1 引言

8K超高清电视是现代广播电视领域中的一项重要业务,也是已经闭幕的东京奥运会和即将于2022年举办的北京冬奥会上的重要直播方式。相比于高清和4K超高清标准,8K标准将分辨率从每帧约207万像素、829万像素提升到3386万像素。此外,8K标准中还进一步提高了再现色域和再现度,并且扩大了亮度空间范围,增加了对比场景的利用率等。因此,8K超高清业务能给观众带来更为震撼、更具沉浸感的收视体验。然而,8K超高清电视直播业务对电视广播网络所支持的吞吐率和带宽的要求进一步提高,其未来应用面临着技术上的挑战。

2019年12月,由中国自主研发的地面数字电视多媒体广播演进标准DTMB-A正式被国际电联采纳为最新的全球数字电视传输标准之一^[1]。DTMB-A采用了时域同步正交频分复用技术(TDS-OFDM),在其保护间隔内使用多载波伪随机序列作为填充,使得信道估计更加精确。在编码调制方面,DTMB-A采用了最高可达到256阶的星座映射以及格雷幅度相移键控(Gray-APSK)调制方式,频谱利用率得以大幅提高。此外,其纠错码采用增强型LDPC编码,进一步提高了系统的抗干扰能力,并降低了数字电视接收终端的实现复杂度。DTMB-A系统最高可提供的传输速率能达到50Mbps,具备优越的单频组网性能,能够实现更大范围的信号覆盖。

近年来,国内的相关高校和研究机构一直在致力于探索基于地面数字电视网络的超高清传输技术。文献[2-4]介绍了若干基于DTMB-A单频网的超高清电视场地试验,验证了其在典型城市环境下的工作性能,其场景包括视距路径(LoS)接收、移动接收、建筑遮挡以及潮汐衰落效应下的接收等。已完成的传输试验表明,DTMB-A在复杂的信道条件下依旧具备可靠的覆盖性能,为进一步的研究试验奠定了良好的基础。

由于8K超高清业务的高清晰度特点^[5-6],即使采用国际上最为先进的AVS3或H.265编解码技术,节目在压缩后的码流速率仍然会大于60Mbps,某些对实时性要求高的业务(如体育节目直播等)甚至会达到200Mbps,这也超过了当前国际上任何数字电视传输标准的最大传输速率。因此,在设计系统时必须采用码流拆分技术,即将8K节目流拆分为若干子流,通过不同的物理信道调制并传输后,接收端

再将接收到的子流合并恢复为原节目流,从而完成传输的全过程。此外,采用正交极化特性的收发天线实现双天线极化传输^[7],或者多信道绑定技术,可进一步提高频带利用率,保障室外接收的可靠性。作为关键的性能指标,双天线的交叉极化隔离度(XPI)和交叉极化鉴别率(XPD)需要在系统测试和场地试验中着重考虑。

鉴于上述分析,本文提出了一种基于DTMB-A的8K超高清数字电视传输系统。为了满足8K超高清直播业务的高速率、高画质要求,系统可采用双天线极化和信道绑定两套不同的实现方案:双天线极化方案使用板状正交极化天线作为发射与接收天线,实际测量其隔离度XPI可达到22dB,可以很好地满足实际工程需求;信道绑定方案则可支持多路信号的绑定传输,可以有效提升系统的最大传输速率。在码流分路中,不同于传统码流分路中平均依次分路的策略,本系统采用了更为灵活的分路方法,能够根据需要采取不同的分路模式。经过硬件的集成和实现,采用4路信道绑定方案可以达到最高200Mbps的传输速率。在农历2020年除夕之夜,整套超高清传输系统在深圳星河户外超高清大屏上首次实现国内基于地面数字电视广播网络的春节联欢晚会8K直播演示试验,获得了理想的效果。

本文将分别介绍双天线极化和信道绑定两种方案的系统结构和技术特点,同时给出了硬件实现方案和测量指标,随后简述外场的试验场景及效果,验证了方案的有效性和实用性。最后,对全文内容进行总结,同时展望进一步的研究方向。

2 双天线极化方案

双天线极化方案中,本地面数字电视传输系统使用极化正交的板状天线作为发射和接收天线,极化天线的两个通道使用相同的频道,能够有效提高频谱资源的利用率。

2.1 系统结构

整个传输系统的结构框图如图1所示。

(1)发射端结构

在发射端,系统首先将高码率的8K超高清节目通过信源编码器转换为传输码流。随后,分路模块将传输码流拆分成为两路子码流,并将其分别送到两路DTMB-A发射机,由后者经过编码调制、组帧等基带信号处理后,经上变频转换成为符合DTMB-A标准的

射频信号。各路射频信号通过功率放大后,由正交极化天线分别传输到无线链路,从而完成信号发射的全过程。

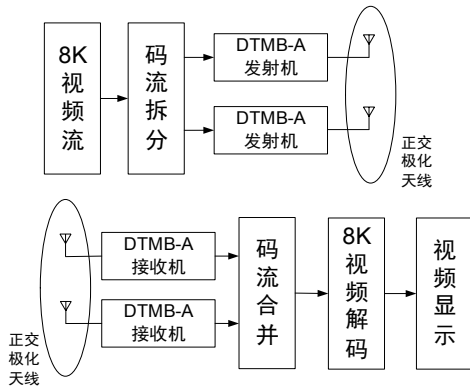


图1 8K超高清数字电视传输系统框图:双天线极化方案

(2)接收端结构

在接收端,系统首先通过另一组正交极化天线接收两路射频信号,分别由不同的DTMB-A接收机完成下变频、解调并输出。随后,码流合并器负责将两路码流合并为一路节目流信号,并送至视频解码模块进行解码。解码后的8K节目流将通过显示器进行播放。

2.2 码流分路与合并策略

如前所述,高码率8K超高清视频节目必须经过码流分路,拆分为若干子流后才能送到DTMB-A发射机完成后续的信号传输过程。为了更好地保障8K业务,本系统采用了一种灵活的分路、合路方法,根据分路设置信息和节目流信息,生成适当的控制策略,实现不同的分路模式。

码流分路部分包括识别分析单元、控制信息插入单元、码流缓存及分路单元、控制设置单元以及信息显示模块。识别分析单元用于对输入码流进行预设控制数据携带包的识别,分析节目流所携带的信息,同时接收信号的参考时钟PCR信息,并判断是否存在独立流需要单独分路处理。分路控制单元负责根据设置信息和节目流的内容分析结果,生成相应的控制策略并对传输码流进行分路处理,同时还需要生成分路控制命令进行缓存和输出操作。此外,在进行码流分路处理时,如果检测到当前处理对象为预设控制数据包,还需要通过控制信息插入单元将其中数据包的数据替换为分路控制数据。信息显示模块则负责显示当前的分路信息。最后由分路单元输出多路码流,分路的处理过程如图2所示。

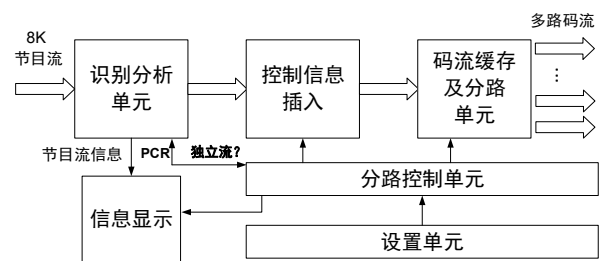


图2 码流分路模块

码流合路部分包括多路码流的缓存单元、同步控制单元,以及码流同步与合路单元。码流缓存单元负责接收各路DTMB-A接收器解调后的码流。码流同步与合路单元负责根据对应的分路控制策略生成相匹配的合路策略,即对分路控制策略进行反操作。若存在独立流时,为使得后续的8K解码器能够正确地完成解码,合路部分需要进行PCR矫正,以增加系统的鲁棒性。特别地,合路策略将依次确定输出码流包的顺序,尤其是滤除发射器部分附加的空包,以完全恢复原先的码流。码流合路的处理过程如图3所示。

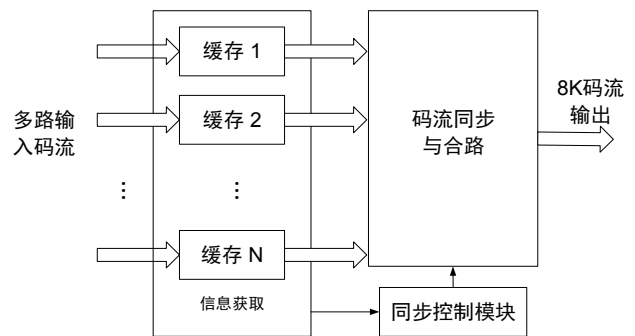


图3 码流合路模块

2.3 双极化天线性能测试

为了衡量双极化天线系统的性能,这里引入了交叉极化隔离度(XPI)和交叉系统鉴别率(XPD)两项指标,并通过室内外的测量实验来分析有关结果。

XPI定义为同一接收端接收到的同相与正交发射信号的功率比值,是由天线的固有特征决定的。XPI的值越大,则信号间的相互干扰越小,也意味着系统的传输质量越好。同时可以计算出对应发射端口的XPD,定义为对应同一发射端在同相和正交接收机处的功率之比。因此,我们设计了测量XPI和XPD的实验,其测量框图见图4。

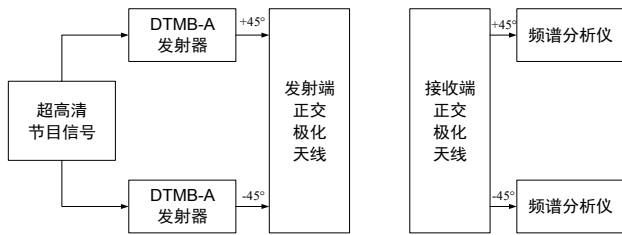


图4 双天线极化方案系统 XPI的测量框图

如图4所示,此测量系统分为射频信号发送部分和接收测试部分。信号发送部分,码流仪播放的超高清数字电视节目分别接入不同的两台DTMB-A发射器,发射机输出的射频信号再分别接入极化发射天线的 $\pm 45^\circ$ 端口。信号接收部分,将极化天线接收到的射频信号接入频谱仪进行测量,并计算相关的参数值。各发射器以及两路信号的相关参数如表1和表2所示。

测试实验共分为八组,分别在室内的两个场景完成。其中,第一至第六组实验在场景一下完成,第七、第八两组实验在场景二中完成,测量场景如图5所示,各组实验的测量结果如图6所示。其中,各实验的内容和参数如下:

(1)第一组实验,主要测试发射端极化天线两路端口信号功率相同时,在接收天线两路端口处的功率情况。天线高度均为1.8米;

(2)第二组实验将发射和接收天线高度分别调整为2.5米和2.6米,其余实验内容与上一组实验一致;

(3)第三组实验将接入 $+45^\circ$ 天线的功率逐步减小,直到接收机有一路信号能够临界播放时,分别关闭两路发射器中的一路,测试接收功率;

(4)第三组实验将接入 -45° 天线的功率逐步减小,直到接收机有一路信号能够临界播放时,分别关闭两路发射器中的一路,测试接收功率;

(5)第五组实验也与第三组内容基本相同,不同之处在于将发射和接收天线高度分别调整到2.5和2.6米;

(6)第六组实验与第五组实验内容基本相同,只是对 -45° 天线进行逐步降低功率的操作,高度仍然为2.5和2.6米;

(7)第七组实验与第一组实验内容相同;

(8)第八组实验衰减接入 $+45^\circ$ 天线功率,使得接收天线在两路端口计算得到的XPI值基本相等。发射、接收天线高度为1.8米。

表1 两路超高清信号的格式参数

参数	编号	
	节目1	节目2
码率	31.3Mbps	38.01Mbps
帧率	60fps	50fps
分辨率	3840×2160	3840×2160
编码格式	HEVC	HEVC

表2 发射器参数

参数	取值
射频中心频率	714MHz
射频带宽	8MHz
输出功率	0dBm
星座映射	256 APSK
LDPC码率	2/3
FFT大小	32K
数据率	39.6Mbps



(a)场景一



(b)场景二

图5 双天线极化方案室内测试场景

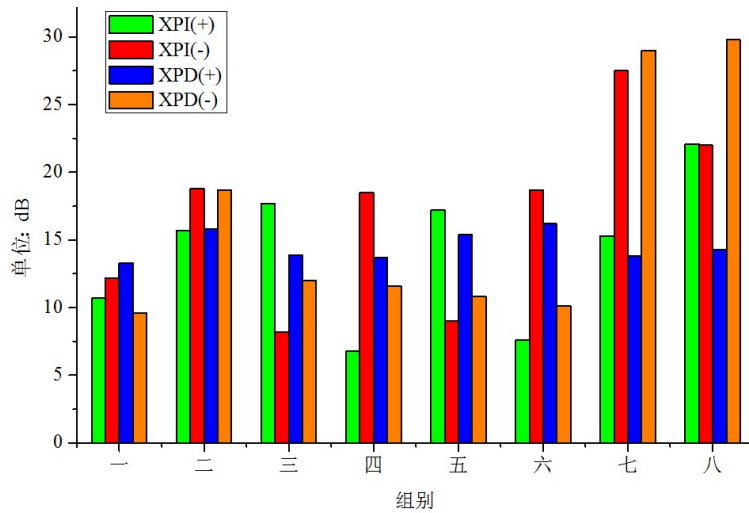


图6 双天线极化方案各组实验的 XPI 和 XPD 测量情况

根据图6给出的实验结果,分析可得:通过对比实验一、二和实验三、四的测量数据,可以发现发射和接收的两路端口结构基本是对称的。在室内场景中,天线高度越高,系统的隔离度越好。场景一中,天线高度为1.8米并保持接入端口功率平衡时,XPI测量值为10.7dB、12.2dB,XPD测量值为13.3dB、9.6dB。天线高度为2.5米左右并保持接入端口功率平衡时,XPI测量值分别为15.7dB、18.8dB,XPD测量值分别为15.8dB、18.7dB。场景二中,调整至两路接收机XPI几乎相等时,测得此时的XPI约为22dB。以上结果表明,该传输系统的性能可以很好地满足工程上的隔离度要求。

3 信道绑定方案

信道绑定方案使用四个数字电视射频信道绑定传输,在发送端同样将8K超高清码流进行码流拆分处理,通过不同发射器将信号调制到不同的射频中心频率,并在接收端恢复出原始信号。通过信道绑定方案,传输系统支持的最大码率能够得到进一步提升。

3.1 系统结构

在信道绑定方案中,由于系统采用四路信道绑定传输,不需要使用极化天线,因此系统结构较双天线极化方案略有差异。如图7所示,在信道绑定方案中,8K超高清码流被拆分为四路,送至不同的发射器作调制和上变频处理,经过天线合路后发射至射频链路。在接收端,通过接收天线将信号分配至四路接收机进行解调,并完成码流合并,再经解码后将超高清节目由大屏幕播放。其中,码流的拆分与合并与双天线极化方案一致。

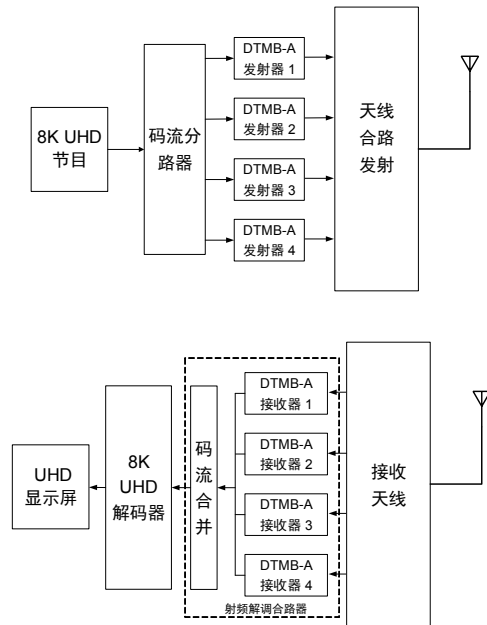


图7 8K超高清数字电视传输系统框图:信道绑定方案

3.2 硬件实现

基于信道绑定的超高清地面数字电视传输系统在硬件上同样分为发射端和接收端两部分。其硬件设备如图8所示,自上至下分别为码流分路设备、多通道信道接收与码流合并设备以及四台符合DTMB-A标准的发射机。8K超高清视频信号首先通过码流分路器,并拆分成4路并行码流,然后分别送到1-4号DTMB-A发射器,将输入的码流调制到不同的射频频率。发射器输出的射频信号经功率放大器放大后送到天线进行发射。接收端的硬件设备经过集成与实现后,信道解调与码流合并等模块已集成于一个机箱内,在图7中表示为虚线

标出部分。其中,8K解码器采用华为海思最新的芯片方案,可有效满足8K超高清视频的解码要求。



图8 传输系统的硬件设备:信道绑定方案

分路和合路的码流处理各采用1片ALTERA的Cyclone IV系列FPGA芯片来实现。此外,由于码流合路的缓存部分涉及较大的存储量,因此虽然合路的逻辑计算为分路的反过程,其同步信息控制还需要采用ARM和额外的SDRAM芯片来实现。

3.3 场地试验

2021年2月,由国家工程实验室、清华大学、广东省超高清视频创新中心、深圳龙岗智能视听研究院联合开展了基于信道绑定方案的8K超高清地面数字电视演示试验,并在深圳的户外超高清大屏上实现了国内首次基于地面数字电视无线广播8K直播,其测试场景如图9所示。



图9 深圳星河CoCo公园8K超高清传输系统测试场景

演示过程中,由中央电视台发送的8K超高清信号速率为120Mbps,经系统接收后分路并转换至4台DTMB-A发射机发射,并经过功率放大器处理后发射至无线链路,再由接收系统的合路、解调和解码等操作恢复原先的8K信号,最终在室外的超高清大屏幕上播放,为观众带来了富有感染力和沉浸感的收视体验。

本系统的具体参数如表3所示。如前文所述,通过信道绑定、码流拆分等技术,系统的最大传输速率可达到200Mbps,能够很好地支持一系列基于8K超高清数字电视的业务。

表3 信道绑定方案的8K超高清传输系统场地测试参数

参数	取值
调制模式	TDS-OFDM
保护间隔比	1/128
射频中心频率	634,642,650,658MHz
差错控制编码	LDPC 61440, 码率 2/3
射频带宽	7.56MHz
视频编码	AVS3 profile 10 level1 0.0.60
音频编码	5.1 环绕声, 448Kbps
最大传输速率	200Mbps

在DTMB-A技术提供的优异性能基础上,本次8K超高清地面数字电视传输现场试验取得了理想效果,同时也验证了本文所提方案的有效性和实用性。现场测试结果也为超高清数字电视服务的产业化积累了丰富的经验,为今后8K的应用与推广奠定了良好基础。

4 总结与展望

本文提出一种基于DTMB-A标准的8K超高清地面数字电视传输系统。针对不同的应用场景,系统可采用双天线极化和信道绑定两种传输方案,在本文中详细介绍了两种方案对应的框架结构和技术特点。通过一组测量实验,本文分析了双天线极化方案系统的隔离度指标XPI和XPD,验证了其在多种场景下的系统性能。此外,本文介绍了基于信道绑定方案的系统硬件实现,以及在深圳成功进行的8K超高清直播演示试验,说明了系统方案的有效性和实用性。本系统在未来有望支持多路4K和4K与8K超高清节目的混合播出,也将对超高清电视业务的发展提供更多有益探索。

参考文献 (References) :

- [1] J Song, C Zhang, K Peng, J Wang, C Pan, F Yang, J Wang, H Yang, Y Xue, Y Zhang and Z Yang. Key Technologies and Measurements for DTMB-A System [J/OL]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2019, 65(1): 53-64.
- [2] 薛永林, 阳辉, 潘长勇, 宋健. 超高清电视地面广播技术与试验系统[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2019, 26(S1):1-4.

- [3] H Li, C Pan, Y Xue, C Zhang, H Yang, J Wang and J Song. 8K Ultra-high Definition Digital Television Transmission System Based on DTMB-A [C]. 2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2020: 1-2.
- [4] Y Xue, H Yang, C Pan and J Song. Field Trial of UHDTV over Digital Television Terrestrial Broadcasting Network [C]. 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2019: 1-3.
- [5] 李瑞杰. 面向超高清视频的无线技术研究[D]. 电子科技大学, 2020.
- [6] 陈亮, 余少华. 5G 端到端应用场景的评估和预测[J]. 光通信研究, 2019(03):1-7.
- [7] R Florencio, J A Encinar, R R Boix, V Losada and G Toso. Reflect array Antennas for Dual Polarization and Broadband Telecom Satellite Applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63 (4):1234-1246.
- [8] H Li, C Pan, H Yang, C Zhang and C Zhao. Single-Channel 8K Ultra-high Definition Digital Television Transmission Using Polarization Diversity[C]. 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), 2019: 1-4.

编辑:龙学锋,李树锋