

ITU-R BS.1114-6 建议书

对 30-3 000 MHz 频率范围内车载的、便携式的和
固定接收机的地面数字声音广播系统

(ITU-R 56/6 号研究课题)

(1994-1995-2001-2002-2003-2004-2007 年)

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 覆盖本地、地区和国家，对 30-3000 MHz 频率范围内车载的、便携式的和固定接收机的地面数字声音广播，在世界范围内引起了越来越多的关注；
- b) 为了说明对车载的、便携式的和固定接收机的 DSB 系统分别对于地面和卫星传输的必然要求，ITU-R 已经采纳了 ITU-R BS.774 建议书和 ITU-R BO.789 建议书；
- c) ITU-R BS.774 建议书和 ITU-R BO.789 建议书承认互为补充地使用地面和卫星系统的好处，并要求 DSB 系统允许具有通用处理甚大规模集成电路（VLSI）的共用接收机和通过大批量生产低成本的接收机；
- d) 附件 2 中描述的数字系统 A 满足 ITU-R BS.774 建议书和 ITU-R BO.789 建议书的所有要求，许多国家已经在 200 MHz-1500 MHz 之间的多个频带对该系统进行了现场测试和演示；
- e) 附件 3 中描述的数字系统 F 满足 ITU-R BS.774 建议书的所有要求，多个国家已经在 188-192 MHz 和 2 535-2 655 MHz 频带对该系统进行了现场测试和演示；
- f) 附件 4 中描述的数字系统 C 满足 ITU-R BS.774 建议书的所有要求，已经在 88-108 MHz 频带对该系统进行了现场测试和演示；
- g) 在第 7 届世界广播联盟大会（1992 年 4 月 27-30 日，墨西哥）上，世界广播联盟一致决定：
 - “1 应努力达成一个在世界范围内唯一的 DAB 标准以及
 - 2 催促管理部门考虑对通用信源编码和信道编码的用户以及在 1.5 GHz 实现全世界基础上的数字声音广播给予援助；”

- h) 为了提供 DSB, 处理在某部分频谱上频率分配问题的世界无线电行政大会(1992 年, 马拉加—拖雷莫利诺斯)(WARC-92)已经将 1 452-1 492 MHz 频带分配给了卫星广播业务 (BSS) 和作为补充的地面广播业务, 对于特定的国家, 还包含在 2 310-2 360 MHz 频带和 2 535-2 655 MHz 频带、分别为《无线电规则》(RR) 的第 750B 款和第 757A 款 (目前为第 5.393 款和第 5.418 款) 的附加的脚注分配。另外, 第 527 号决议 (WARC-92) 提出了地面 VHF 主题;
- j) MPEG-2 运输流 (MPEG-2 TS) 作为运输数字编码信息的容器被广泛应用;
- k) 在欧洲的标准化进程已经导致数字系统 A (Eureka 147, 作为 ETSI ETS 300 401 标准) 被采纳, 代替 BSS (声音) 广播声音至车载的、便携式的和固定的接收机;
- l) 在日本的标准化进程已经导致数字系统 F 作为声音广播的综合业务数字地面广播 (ISDB-T_{SB}) 被采纳, 代替对车载的、便携式的和固定接收机的数字地面声音广播系统;
- m) ISDB 技术能够用于实现充分发挥数字广播全部优势的业务, ITU-R BT.1306 建议书包含了用于数字地面电视广播的 ISDB-T 系统,

注意到

- a) 数字系统的概述见附件 1;
- b) 关于数字系统 A、F 和 C 的简明的系统描述分别见附件 2、3 和 4;
- c) 数字系统 A、F 和 C 的完整的系统描述包含在数字声音广播手册中,

建议

- 1 分别在附件 2、3 和 4 中描述的数字系统 A、F 和/或 C, 应被用于对 30-3000 MHz 频率范围内车载的、便携式的和固定接收机的地面 DSB 业务;
- 2 希望实现地面 DSB 业务满足 ITU-R BS.774 建议书中规定的部分或全部要求的管理部门, 在选择系统时应该使用表 1 来评价数字系统 A、F 和 C 各自的优点。

表 1

以在 ITU-R BS.774 建议书中列出的推荐技术和运行特性为基础，
评价数字系统 A、F 和 C 的性能

来自 ITU-R BS.774 建议书 的特性 (简洁的措词)	数字系统 A	数字系统 F	数字系统 C
音质范围和接收类型	<p>每个音频信道音质范围从 8-384 kbit/s, 以 8 kbit/s 递增, 在接收机中配备典型地工作在 192 kbit/s 的 MPEG-2 第 II 层音频解码器。</p> <p>该系统是为车载的、便携式的和固定的接收设计的</p>	<p>音质范围从电话质量到 CD 质量, 也能够达到 5.1 多声道音频。对于立体声, MPEG-2 高级音频编码 (AAC) 解码器典型地工作在 144 kbit/s。</p> <p>该系统是为车载的、便携式的和固定的接收设计的</p>	<p>采用 HD 编解码器⁽¹⁾ 的解码器, 音质范围从 48 kbit/s 到 96 kbit/s。</p> <p>该系统是为车载⁽²⁾、便携式的和固定的接收设计的</p>
频谱效率高于 FM	<p>在小于 200 kHz 的带宽内可以获得 FM 立体声质量; 同信道和相邻信道保护要求比对 FM 的保护要求低得多。在中继器重复使用相同频率的情况下, 效率格外地高。(具有卷积纠错编码、编码的正交频分复用 (COFDM) 的正交多载波调制)</p>	<p>在小于 200 kHz 的带宽内可以获得 FM 立体声质量; 同信道和相邻信道保护要求比对 FM 的保护要求低得多。在中继器重复使用相同频率的情况下, 效率格外地高。使用 16/64 正交幅度调制 (QAM) 载波调制, 效率会更高。(具有级联码组和卷积纠错编码的正交频分复用 (OFDM))</p>	<p>不需要另外的频谱就可以获得 FM 立体声质量和数据; 同信道和相邻信道保护要求比对 FM 的保护要求低得多。系统是交织的以便减轻第一相邻信道问题, 系统在存在同信道模拟数字干扰的情况下更为牢靠</p>

表 1 (续)

来自 ITU-R BS.774 建议书 的特性 (简洁的措词)	数字系统 A	数字系统 F	数字系统 C
在多径和遮蔽环境中的性能	系统针对多径效应进行了特别设计，它以落在一个给定时间间隔内的回波的功率和为基础开展工作。 这个属性允许使用同频中继器来覆盖地形被遮蔽的区域	系统针对多径环境进行了特别设计，它以落在一个给定时间间隔内的回波的功率和为基础开展工作。 这个属性允许使用同频中继器来覆盖地形被遮蔽的区域	系统针对多径效应进行了特别设计，系统采用 OFDM 调制，因而在多径方面获得了较高的性能。 这个属性允许使用同频中继器来覆盖地形被遮蔽的区域
适于卫星 (S) 和地面 (T) 广播的共用接收机信号处理	不适用。 只用于地面	不适用。 只用于地面	不适用。 只用于地面
重新配置和质量对比节目数量的权衡	取决于错误保护的级别，业务多路复用以 64 个、容量从 8 bit/s 到约 1 Mbits/s 变化的子信道为基础，它在动态样式中是完全可配置的。每个子信道也能够包含不限数量的、可变容量的数据分组信道	有效载荷数据的多路复用以 MPEG-2 系统为基础。为了权衡节目音质相对于业务的数量，能够以任何步幅选择音频数据的速率。传输参数例如调制和纠错，由传输和多路复用配置控制 (TMCC) 动态地重新配置	在音频 48 到 96 kbit/s 的范围内，为了增加或减少数据速率，可由广播公司自行采用 HDC 传输功能动态地重新配置音频或数据位。 接收机动态地重新配置以便与运行的传输模式相匹配
覆盖范围对比节目数量的权衡	通过对 64 个子信道中的每一个子信道应用截短的卷积编码，可以获得五级音频业务保护和八级数据业务保护 (前向纠错 (FEC) 范围从 1/4 到 3/4)	可以获得五种调制和五级保护。(载波调制: 差分四相相移键控 (DQPSK), QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 编码率: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)	系统对所有的节目保持相同的覆盖，当存在相邻信道干扰时，副载波可能已经减小了范围。(载波调制: QPSK)

表 1 (续)

来自 ITU-R BS.774 建议书 的特性 (简洁的措词)	数字系统 A	数字系统 F	数字系统 C
适于不同节目传送方式的共用接收机 — 地面业务 — 合成/混合 — 电缆发送	允许采用相同调制的、有一个或多个发射机工作在单一频率网络上的本地、地区和国家地面业务采用共用接收机 允许使用与地面声音广播相同的频带(合成), 以及使用地面同频中继器来增加卫星的覆盖范围(混合), 使所有这些信道能够被共用接收机透明地接收。 信号能够经过电缆透明地传输	允许采用相同调制的、有一个或多个发射机工作在单一频率网络上的本地、地区和国家地面业务采用共用接收机 允许使用与地面声音广播相同的频带(合成), 以及使用地面同频中继器来增加卫星的覆盖范围(混合), 使所有这些信道能够被共用接收机透明地接收。 信号能够经过电缆透明地传输	系统使用共用天线和与现有模拟 FM 广播设备兼容的前端。在混合模式的数字部分或者全数字模式下, 允许本地业务以及地区、国家地面业务有一个或多个发射机工作在单一频率的网络上, 允许共同传送 FM 节目, 从而实现从数字到模拟以及反过来从模拟到数字的无缝过渡 信号能够经过电缆透明地传输

表 1 (续)

来自 ITU-R BS.774 建议书 的特性 (简洁的措词)	数字系统 A	数字系统 F	数字系统 C
与节目相关数据 (PAD) 能力	通过减少音频信道相应的数量, 可以获得 0.66 kbit/s 到 64 kbit/s 容量的 PAD 信道。所有的接收机都可以获得仅呈现为接收机字母数字显示的、关于节目和业务标识的动态标记。带图像显示 (1/4 视频图形阵列 (VGA)) 的接收机具有基本超文本标识语言 (HTML) 解码和联合图像专家组 (JPEG) 图像解码, 等。	PAD 多路复用以 MPEG-2 系统为基础	PAD 是系统的一个主要组成部分, 可以通过一切可以利用的、不降低音质或减少数据信道的数据来提供 PAD。所有的接收机都可以获得仅呈现为接收机字母数字显示的、关于节目和业务标识的动态标记
业务的灵活分配	多路复用能够以对用户透明的方式动态地重新配置	多路复用能够以对用户透明的方式动态地重新配置	系统以对用户透明的方式自动地在音频和数据之间重新配置
多路复用结构与开放系统互连 (OSI) 的兼容性	系统多路复用结构与 OSI 分层模型兼容, 尤其对数据信道而言, 除了 MPEG-2 第 II 层音频信道的不均匀差错防护特性以外	系统多路复用结构与 MPEG-2 系统体系结构完全兼容	系统以 OSI 分层模型为基础, 包括数据和音频, 除了给音频编解码器提供的独特的差错防护以外

表 1 (续)

来自 ITU-R BS.774 建议书 的特性 (简洁的措词)	数字系统 A	数字系统 F	数字系统 C
增值数据能力	任何不用于音频的子信道 (在 64 个子信道以外) 都可以被用于与节目无关的数据业务。用于所有接收机都可获得的高优先级业务的数据分组信道, 被调整成多路复用的一种业务, 可以在快速信息信道 (FIC) 中传送, 总的容量可达 16 kbit/s。接收机配备无线电数据接口 (RDI), 用于把数据传递到计算机	在有条件的访问控制下, 如果需要的话, 为了传送业务数据、传呼, 甚至图像图形等, 可以分配给独立数据达到全部有效载荷容量的速率	在有条件的访问控制下, 如果需要的话, 为了传送业务数据、传呼, 甚至图像图形等, 可以分配给独立数据达到全部有效载荷容量的速率
接收机低成本制造	允许大批量生产和低成本的用户接收机, 典型的接收机已经被集成在 2 个芯片中, 单芯片制造商已经能把所有的接收机电路集成到一个芯片中	为了实现最初的低复杂度的车载接收机调度, 对系统作了特别的优化。为了获得基于大规模集成电路 (LSI) 大批量生产技术的低成本接收机, 已经建立了标准化组织	为了实现最初的低复杂度的车载接收机调度, 对系统作了特别的优化

⁽¹⁾ 有关 HD 编解码器 (HDC) 的补充信息见 www.ibequity.com.

⁽²⁾ 在带内信道上 (IBOC) 芯片组中实现的模式 (数字系统 C) 不支持频率在 230 MHz 以上的车载工作。

附 件 1

数字系统概述

1 数字系统 A 概述

数字系统 A，也被称作 Eureka 147 数字声音广播（DAB）系统，已经发展为卫星广播和地面广播两方面的应用以便允许使用共用的低成本接收机。该系统被设计成提供车载的、便携式的和固定的接收，接收采用位于地面上方 1.5 m、低增益全向接收天线。数字系统 A 允许互为补充地使用卫星和地面广播发射机，从而所有的接收地点都能获得更高的频谱效率和更高的业务可用性。它通过采用同频地面中继器来填补覆盖间隙，特别地提供了在多径和遮蔽环境下的改进性能，而这些环境是典型的城市接收状况。数字系统 A 能够提供各种级别的声音质量，直到高质量的声音可以和从用户数字记录的媒体获得的声音相比，它也能够提供各种数据业务和不同级别的有条件访问，以及动态地重新安排包含在多路复用中的各种业务的能力。

2 数字系统 F 概述

数字系统 F，也被称作 ISDB-TSB 系统，被设计成提供具有高可靠性的高质量声音和数据广播，即便是在移动接收中。该系统也被设计成为使用地面网络的多媒体广播提供灵活性、可扩展性和通用性，该系统是一个采用 OFDM 调制、二维频率—时间交织和级联纠错码的牢靠的系统，系统中采用的 OFDM 调制被称为频带分段传送（BST）-OFDM，该系统与用于地面电视广播的 ISDB-T 系统在物理层有共同之处，该系统具有许多传输参数，例如载波调制体制、内部纠错码的编码率和时间交织的长度，一些载波被分配给 TMCC 载波，该载波发送用于接收机控制的传输参数信息。数字系统 F 能够采用高压缩音频编码方式例如 MPEG-2 AAC。并且，该系统采用 MPEG-2 系统，它与采用 MPEG-2 系统的其它系统如 ISDB-S、ISDB-T 和 DVB-T 具有通用性和互操作性。

3 数字系统 C 概述

数字系统 C，也被称作 IBOC DSB 系统，是一个十分发达的系统。该系统被设计成采用地面发射机提供车载的¹、便携式的和固定的接收。虽然数字系统 C 能够在空闲的频谱上实现，但是该系统的一个重要特性是它能够在现有的 FM 广播频带上提供模拟和数字信号的同时联播，这个系统特性将被容许现有 FM 广播公司所寻求的从模拟广播过渡到数字广播的合理转变。该系统在多径环境下提供改进的性能，从而使系统的可靠性要高于现有模拟 FM 工作提供的可靠性。数字系统 C 提供可以和从用户数字记录的媒体获得的音质相比的、提高的音质。而且，该系统给广播公司加入了灵活性，能够提供除了增强的音频节目之外新的数据广播业务。此外，为了使数据广播的能力最大化，该系统允许音频和数据广播容量之间的比特配置。

¹ 在 IBOC 芯片组中实现的模式（数字系统 C）不支持频率在 230 MHz 以上的车载工作。

附件 2

数字系统 A

1 引言

数字系统 A 被设计成为车载的、便携式的和固定接收机的接收提供高质量、多业务的数字无线广播，它被设计成能工作在一直到 3000 MHz 的任何频率，适用于地面、卫星、混合（卫星和地面）和电缆广播传输，该系统也被设计成为一个灵活的、通用的 ISDB 系统，能够支持许多种信源编码和信道编码选项、与声音节目有关的数据和独立的数据业务，符合 ITU-R BO.789 建议书和 ITU-R BS.774 建议书给出的灵活的、远距离的业务和系统要求，为数字声音广播手册和 ITU-T BS.1203 报告所支持。

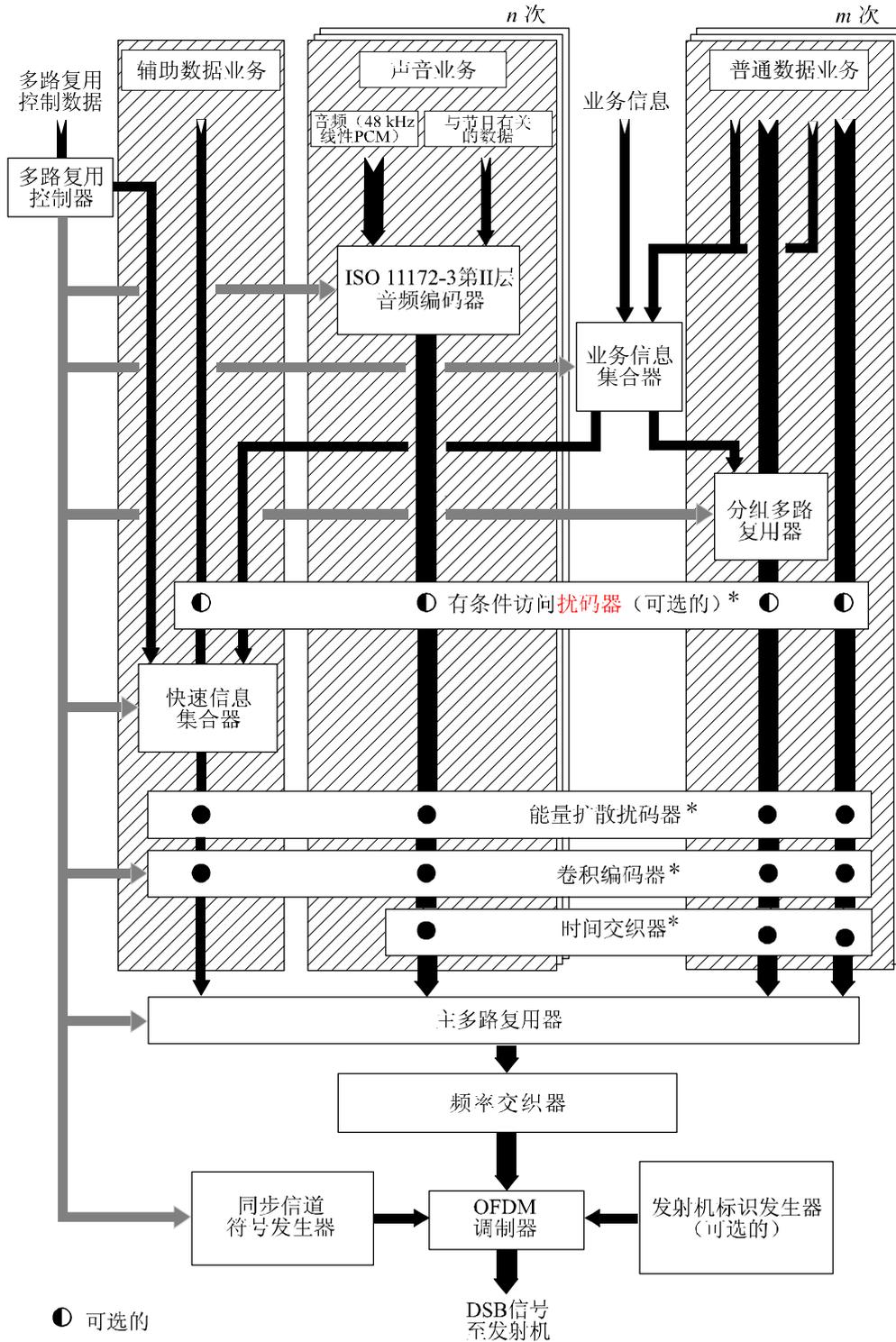
该系统是一个牢靠的、然而频谱效率和功率效率很高的声音和数据广播系统，它采用先进的数字技术消除音频信源信号的冗余和感知的不相关信息，然后为了纠错给发送的信号加上严格控制的冗余码，发送的信息于是被扩展在频域和时域上以便接收机获得高质量的信号，即便是工作在严重的多径传播的情况下，不论固定还是移动。通过对多个节目信号进行交织可以获得高效的频谱利用，频率复用专门的特性允许使用另外的全都工作在相同发射频率上的发射机来几乎没有限制地扩展广播网络。

系统 A 发送部分的概念图见图 1。

数字系统 A 已经由 Eureka 147 DAB 企业集团开发，并被称为 Eureka DAB 系统。鉴于欧洲在 1995 年引入了数字声音广播业务，它得到了欧洲广播联盟（EBU）的积极支持。从 1988 年起，该系统已经在欧洲、加拿大、美国和全世界的其它国家成功地进行了演示和广泛的测试。在附件 2 中，数字系统 A 被称作“系统 A”，完整的系统规范被作为欧洲电信标准 ETS 300 401（见注 1）。

注 1 — 增加新的传输模式来弥合目前模式 I 和 II 之间的差异，已经被认为是可取的，正在被当作是对系统 A 的兼容性提高，以便允许用于单一频率网络中的同信道中继发射机之间隔开更远的距离，或者被用作覆盖范围的扩展器或者覆盖间隙填补器，从而使在 1452-1492 MHz 频带实现地面 DSB 时灵活性更强、成本更低。

图1
系统 A 发送部分的概念图



2 分层模型的使用

系统 A 遵循在 ISO 7498 (1984) 中描述的国际标准化组织 (ISO) OSI 基本参考模型, ITU-R BT.807 建议书和 ITU-R BT.1207 报告推荐使用这个模型, 并且建议书给出了有关分层的广播系统使用的适当说明。根据这一指导, 将从模型的各个层次来描述系统 A, 这里适用的说明如表 2 所示。

许多相关的技术最容易以在发射机端或者存在发射机网络时位于分布网络中心点的设备的运行来进行描述。

表 2
OSI 分层模型说明

层的名称	说明	系统特有的特性
应用层	系统的实际使用	系统功能 音质 传输模式
表示层	为了表示进行变换	音频编码和解码 音频表示 业务信息
会话层	数据选择	节目选择 有条件地访问
传输层	数据分组	节目业务 主要业务多路复用 辅助数据 数据关联
网络层	逻辑信道	ISO 音频帧 与节目有关的数据
数据链路层	发送信号的格式	传输帧 同步
物理层	物理 (无线电) 传输	能量扩散 卷积编码 时间交织 频率交织 DQPSK OFDM 调制 无线电传输

系统 A 的基本目的是为无线电收听者提供声音节目, 因而在下列描述中各节的顺序将从应用层开始(广播信息的使用), 向下到物理层 (无线电传输的方式)。

3 应用层

本层关注的是在应用层次系统 A 的使用, 它考虑的是系统 A 提供的和广播公司能够为他们的听众提供的设备和音质, 以及不同的传输模式。

3.1 系统提供的功能

系统 A 提供传送多路数字数据的信号，这个信号能同时传送多个节目，多路复用包含音频节目数据以及由 PAD、多路复用配置信息（MCI）和业务信息（SI）组成的辅助数据。多路复用也能传送可能与声音节目的传输不相关的普通数据业务。

特别地，系统 A 的用户可以获得下列功能：

- 由所选择的节目业务提供的音频信号（即节目）；
- 接收机功能的可选应用，例如可能使用节目所传送的辅助数据的动态范围控制；
- SI 中传送的选择信息的文本显示，这可能是关于选择节目的信息，或者是关于其它有效的可选选择的信息；
- 选择其它节目、其它接收机功能和其它 SI 的有效选项；
- 一个或多个普通数据业务，例如业务消息信道（TMC）。

系统 A 包括有条件地访问功能，接收机可以装备音频和数据信号数字输出口。

3.2 音质

在多路复用的容量范围内，可以选择节目业务的数量以及每一个节目业务的表示格式（例如立体声、单声道、声音环绕等）、音质和差错防护的级别（因此牢靠）以便满足广播公司的需要。

关于音质，可以获得下列范围的选项：

- 非常高的质量，有音频处理余量；
- 主观上透明的质量，足够用于最高质量的广播；
- 高质量，相当于好的 FM 业务质量；
- 中等质量，相当于好的 AM 业务质量；
- 只有语音的质量。

系统 A 在发射机覆盖的极限范围内提供所有质量的接收；超过这些极限，接收质量以主观上适度的方式降低。

3.3 传输模式

系统 A 具有四个可供选择的传输模式，这些传输模式允许使用宽波段的、直到 3 GHz 的发射频率。针对存在多径回波时的可移动接收，这些传输模式已经被设计成能够处理多普勒展宽和时延延长。

表 3 给出了移动接收时推断的回波时延和标称的频率范围，实际上极少发生的、在最高频率点和在最严重多径状况下的噪声衰减在 100 km/h 时等于 1 dB。

表 3

参 数	模式 I	模式 II	模式 III	模式 IV
保护间隔时间 (μs)	246	62	31	123
推断的回波时延达相当于 (μs)	300	75	37.5	150

从表 3 可以看出, 较高频率的使用给最大回波时延带来了较大的限制。由于模式 I 允许最大的发射机间隔, 因此最适用于地面单频网络 (SFN)。模式 II 最适合于要求一个地面发射机的本地无线电应用, 以及直到 1.5 GHz 的混合卫星/地面传输。然而, 如果有必要的话, 通过在发射机端插入人为的时延和/或使用定向发射天线, 模式 II 也能用于 UHF 频带 (例如在 1.5 GHz 频率)、中到大规模的 SFN。模式 III 最适合在直到 3 GHz 的所有频率点进行卫星和作为补充的地面传输。

模式 III 还是直到 3 GHz 电缆传输的首选模式。

模式 IV 最适用于 UHF 频带、中到大规模的 SFN。

4 表示层

本层关注的是广播信息的变换和表示。

4.1 音频信源编码

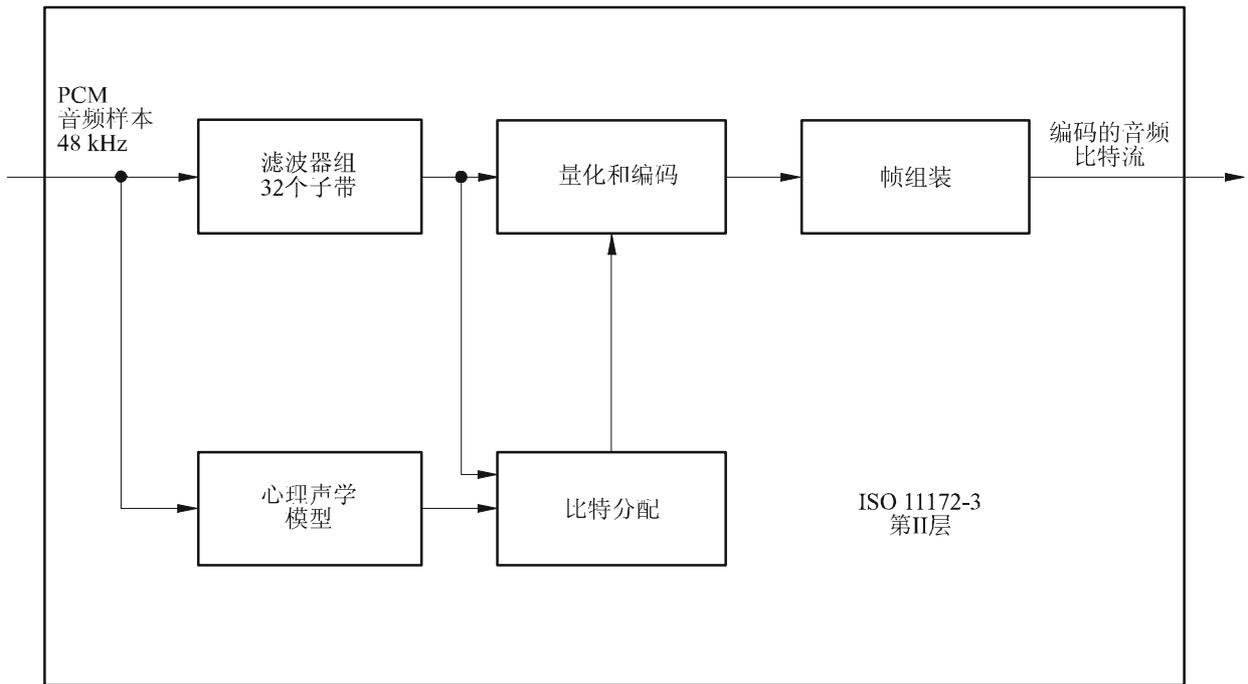
该系统采用的音频信源编码方式是在 ISO 标准 11172-3 中规定的 ISO/IEC MPEG 音频第 II 层, 这个子带编码压缩系统也被称作 MUSICAM 系统。

系统 A 接收大量抽样速率为 48 kHz 的 PCM 音频信号和 PAD, 可能的音频信源的数量取决于比特率和差错防护的分布, 音频编码器能够工作在每个单声道 32、48、56、64、80、96、112、128、160 或 192 kbit/s, 在立体声或者双声道模式下, 编码器产生两倍于单声道的比特率。

广播公司能够根据需要的固有质量和/或提供的声音节目的数量来采取不同的比特率选择, 例如, 对于单声道, 采用的比特率大于或等于 128 kbit/s, 对于立体声节目, 比特率大于或等于 256 kbit/s, 不仅能够提供非常高的质量, 而且能够提供一些处理余量, 足够进一步的多重编码/解码处理, 包括音频后处理。为了高质量的广播, 应选择对于单声道比特率为 128 kbit/s 或者对于立体声比特率为 256 kbit/s, 从而提供完全透明的音质。甚至每个立体声节目比特率为 192 kbit/s 通常能够满足对于数字音频比特率降低系统的 EBU 要求。对于单声道, 比特率为 96 kbit/s 能提供好的音质, 48 kbit/s 能够提供大致与普通 AM 广播相同的音质。对于一些只有语音的节目, 比特率为 32 kbit/s 可能就足够, 这种情况下在系统多路复用的范围内需要最大数量的业务。

音频编码器中功能单元的方框图如图 2 所示。输入 PCM 音频样本被输送到音频编码器, 一个编码器能够处理立体声信号的两个声道, 虽然可选地, 可能给它提供单声道信号。多相滤波器组将数字音频信号分成 32 个子带信号, 建立输入音频信号的滤波过的和欠抽样的表示。滤波过的样本被称作子带样本, 人耳的感知模型建立一组数据来控制量化器和编码, 取决于编码器实际的实现, 这些数据可以不相同。一种可能性是使用屏蔽门限的估值来获得这些量化器控制数据, 各个子带信号的连续样本被分成组, 然后在每组中, 各个子带信号达到的最大幅度由比例因子决定和表示, 量化器和编码单元从子带样本中建立一组编码字, 在 ISO 音频帧期间执行这些处理, ISO 音频帧将在网络层中描述。

图 2
基本的系统音频编码器框图

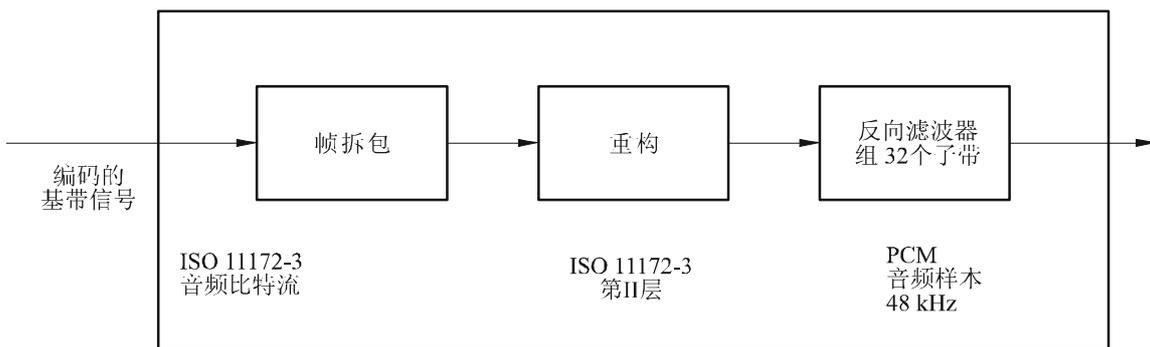


1114-02

4.2 音频解码

接收机中的解码是直接地和节省地运用简单的信号处理技术，只需要多路分解、扩展和反向滤波操作，解码器中功能单元的框图如图 3 所示。

图 3
基本的系统音频解码器框图



1114-03

ISO 音频帧被输送到 ISO/MPEG 音频第 II 层解码器，该解码器把帧数据拆包以便恢复信息的各个要素，重构单元重新产生量化的子带样本，反向滤波器组对子带样本进行反转换产生抽样速率为 48 kHz 的、数字匀速 PCM 音频信号。

4.3 音频表示

音频信号可以表示成单声道或立体声，或者为了声音环绕对音频信道进行分组，节目可以被连接起来以便同时提供采用多种不同语言的同一节目。为了使在高保真和嘈杂环境中的收听者都满意，广播公司能够可选地发送动态范围控制（DRC）信号，这个信号能够被嘈杂环境中的接收机用于压缩再生音频信号的动态范围，注意到这项技术也能对听力受损的收听者有益。

4.4 业务信息表示

和系统传送的各个节目一起，SI 的下列要素能够有效地在接收机上显示：

- 基本的节目标记（即节目的名称），
- 时间和日期，
- 相互参照采用另外信号组发送的或者被 AM 或 FM 业务同时联播的相同的或相似的节目（例如，采用另一种语言），
- 与节目有关业务的扩展业务标记，
- 节目信息（如，表演者的名字），
- 语言，
- 节目类型（如，新闻，体育、音乐等），
- 发射机标识号，
- 业务消息信道（TMC，可能使用接收机中的语音合成器）。

发射机网络数据也可以包含在内，供广播公司内部使用。

5 会话层

本层关注的是广播信息的选择和访问。

5.1 节目选择

为了使接收机能够以最小的总时延访问任何一个或者所有的独立业务，由 FIC 传送关于多路复用当前和将来内容的信息，这个信息就是 MCI，是机器可读的数据。FIC 中的数据不经过时间交织，因此 MCI 不会经历在应用于音频和一般数据业务的时间交织处理中固有的时延，然而，要经常重复发送这些数据以确保它们的牢靠性。当多路复用配置将要改变时，要在 MCI 中提前发送新的信息连同定时的变化。

接收机的使用者可以根据 SI 中传送的文本信息，使用节目业务名称、节目类型标识号或者语言来选择节目，然后使用 MCI 的相应要素在接收机中实现选择。

如果所选择节目业务的备选来源有效并且最初的数字业务变得难以维持，则在 SI 中传送的连接数据（即“相互参照”）可能用于标识一个备选的来源（如，在 FM 业务中）并转换到这个来源。然而，在这种情况下，一旦可以接收，接收机就将转回到最初的业务。

5.2 有条件地访问

对有条件访问的同步和控制作出规定。

有条件地访问能够独立地应用于业务分量（在主要业务信道（MSC）或 FIC 中传送）、业务或者整个多路复用。

6 传输层

本层关注的是被看作节目业务的数据组的标识、那些业务数据的多路复用，以及多路复用数据要素的关联。

6.1 节目业务

节目业务通常包含由一个业务提供者提供的一个音频服务分量和可选的另外的音频和/或数据业务分量。多路复用的全部容量可能供一个业务提供者专用（例如，广播 5 个或者 6 个高质量的声音节目业务），或者分成几个部分用于几个服务提供者（例如，共同地广播大约二十个中等质量的节目业务）。

6.2 主要业务多路复用

根据图 1，每个被广播的节目的数据表示（带有一些辅助数据的数字音频信号，可能还有普通的数据）都要经过为了差错防护的卷积编码（见第 9.2 节）和时间交织。时间交织提高了在变化着的环境（例如，通过移动中的车载接收机进行接收）中数据传输的牢靠性，并强加了可以预测的传输时延。交织和编码过的数据然后被输送到主业务复用器，在这里每隔 24 ms，数据按顺序聚集成一个复用帧，复用器输出的组合比特流被称为 MSC，其总容量为 2.3 Mbit/s。取决于所选择的编码率（它可能因业务分量而不同），使范围大约为 0.8 到 1.7 Mbit/s 的净比特率通过 1.5 MHz 的带宽，主业务复用器把所有采用多路复用的节目业务的同步数据汇聚在一起。

普通数据可能在 MSC 中作为非正式的流被发送，或者当作分组复用被编组，这种情况下多个信源被组合在一起，数据速率可能为 8 bit/s 的任意倍数，与系统多路复用同步，受限于充足的多路复用总容量，考虑到音频业务的需要。

FIC 在 MSC 的外面，不经过时间交织。

6.3 辅助数据

在系统多路复用内部，有三个区域可能会传送辅助数据：

- FIC，具有有限的容量，取决于所包含的基本 MCI 的数量；
- 在每个音频信道内，对于要被传送的、数量适中的 PAD 有特别的规定；
- 所有剩余的辅助数据被当作 MSC 内一个单独的业务，在 MCI 中用信号通知存在这个信息。

6.4 数据关联

MCI 提供 MSC 当前和将来内容的准确描述，MCI 由 FIC 传送。与 MSC 的内容有关的、SI 的基本条款（例如关于节目选择）也必须在 FIC 中传送，更广泛的文本，例如全天节目的列表，必须作为一项普通的数据业务单独地传送，因此，MCI 和 SI 包含来自被广播的所有节目的成分。

在各个音频信道内传送的 PAD 主要包括与声音节目密切相关的信息，因此不能采用可能会经历不同传输时延的不同数据信道发送。

7 网络层

本层关注的是被看作节目的数据分组的标识。

7.1 ISO 音频帧

在 24 ms 长的 ISO 音频帧期间进行音频信源编码器中的处理，随着帧的不同而变化的比特分配和比例因子经过编码，同各个 ISO 音频帧中的子带样本一起多路传输，帧组装单元（见图 2）把量化和编码单元输出数据的实际比特流汇聚在一起，并增加其它信息，例如报头信息、用于错误检测的 CRC 字和 PAD，这些信息同已编码的音频信号一起传输。每个音频信道包含一个具有可变容量（通常至少为 2 kbit/s）的 PAD 信道，该信道可以用来传送与声音节目密切相关的信息，典型例子是歌词、语言/音乐表示和 DRC 信息。

对于单个节目，最后得到的音频帧传送表示 24 ms 立体声（或单声）音频的数据，加上 PAD，并且符合 ISO 11172-3 第 II 层格式，因而它可以被称作 ISO 帧，这样允许使用接收机中的 ISO/MPEG 音频第 II 层解码器。

8 数据链路层

本层提供了接收机同步的方式。

8.1 传输帧

为了便于接收机同步，发送的信号按照正规的帧结构来构造（见图 4）。传输帧包含一个固定的符号序列，第一个符号是提供粗略同步的一个空号（当没有 RF 信号被发送时），接着是一个固定参考符号，提供接收机中的精确同步、自动增益控制（AGC）、自动频率控制（AFC）和相位参考功能；这些符号组成了同步信道。下一个符号为 FIC 保留的，剩余的符号提供 MSC。取决于表 4 给出的传输模式，总的帧持续时间 T_F 为 96 ms、48 ms 或者 24 ms。

图 4
多路复用帧结构

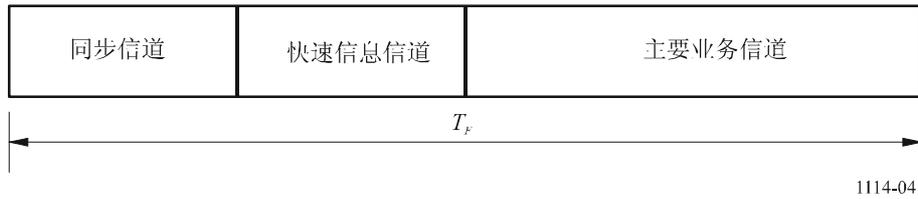


表 4
系统 A 的传输参数

参 数	模式 I	模式 II	模式 III	模式 IV
传输帧持续时间, T_F	96 ms	24 ms	24 ms	48 ms
空号持续时间, T_{NULL}	1.297 ms	324 μ s	168 μ s	648 μ s
OFDM 符号持续时间, T_s	1.246 ms	312 μ s	156 μ s	623 μ s
载波间隔的倒数, T_u	1 ms	250 μ s	125 μ s	500 μ s
被称作保护间隔的时间间隔宽度, Δ ($T_s = T_u + \Delta$)	246 μ s	62 μ s	31 μ s	123 μ s
发送载波的数量, K	1 536	384	192	768

MSC 内各个音频业务被分配帧中一个固定的时隙。

9 物理层

本层关注的是无线电传送的方式（即调制体制和相关的差错防护）。

9.1 能量扩散

为了在发送的信号中确保适当的能量扩散，输送到多路复用器的各个信源是混杂在一地起的。

9.2 卷积编码

卷积编码应用于输送到多路复用器的各个数据信源，以确保可靠地接收。编码过程包括给信源数据字符组故意增加冗余（使用的约束长度为 7），产生“总的”数据字符组。

对于音频信号，遵循一个预先选择的、被称作不均匀差错防护（UEP）分布的模型，要赋予一些信源编码比特比其它比特更多的保护。平均编码率，定义为信源编码比特数与卷积编码以后已编码的比特数的比，可以在 1/3（最高的保护级别）到 3/4（最低的保护级别）之间取值。依据要求的保护级别和信源编码数据的比特率，不同的音频信源可以采取不同的平均编码率。例如，电缆网络传输的音频业务的保护级别可能比无线电频率信道传输业务的保护级别要低。

普通数据业务选择一个不变的速率进行编码，FIC 中的数据采用编码率为常数 1/3 进行编码。

9.3 时间交织

为了对移动接收机提供进一步支持，将交织深度为 16 帧的时间交织应用于卷积编码过的数据。

9.4 频率交织

在多径传播的情况下，一些载波被有益的信号增强，而其它载波则会遭受相消干扰（频率选择性衰落）。因此，系统通过重新安排载波之间的数字比特流提供频率交织，使得连续的信源样本不会受到选择性衰落的影响。当接收机固定不动时，频域中的分集是确保成功接收的主要手段。

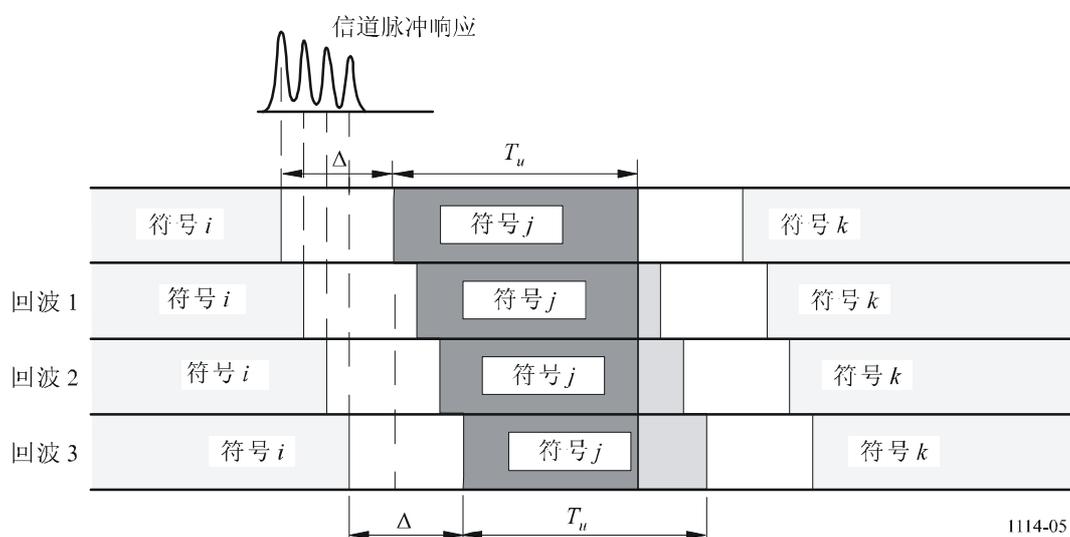
9.5 4-DPSK OFDM 调制

系统 A 采用 DQPSK OFDM。这种体制能够满足对移动的、便携式的和固定接收机进行高比特率数字广播的苛刻要求，尤其是在多径的环境中。

基本准则包括把将要发送的信息分成多个低比特率的比特流，然后这些比特流用来调制各个载波，相应的符号持续时间变得要大于传输信道的时延延长，在接收机端任何比保护间隔时间短的回波将不会引起符号间干扰，反而对接收功率有积极的作用（见图 5）。 K 个载波共同地被称作一个集合。

图 5

回波的积极作用



存在多径传播时，一些载波被有益的信号增强，而另一些载波则遭受相消干扰（频率选择性衰落），因此，系统 A 包括在时间和频率上重新分配数字比特流的要素，这样连续的信源样本会受到独立衰落的影响。当接收机固定不动时，频域中的分集是确保成功接收的唯一手段；时间交织提供的时间分集不会对固定的接收机有帮助。对于系统 A，多径传播是空间分集的一种形式，并被当作是一个显著的优点，和传统的 FM 或者窄带信号系统形成鲜明的相比，在那些系统里多径传输能够彻底地毁坏一个业务。

在任何能够从多径获益的系统中，传输信道的带宽越大，系统就越牢靠。在系统 A 中，选择 1.5 MHz 的总带宽以确保宽带技术的优势，以及允许灵活地规划。表 4 也指出了在这个带宽内每一种传输模式 OFDM 载波的数量。

使用 OFDM 的进一步的好处是大面积覆盖的单一频率网络以及稠密的城区网络能够获得较高的频谱效率和功率效率。提供相同节目的任意数量的发射机可以工作在相同的频率上，这样也会导致需要的运行功率全面地降低，进一步的结果是不同服务区域之间的距离明显减少。

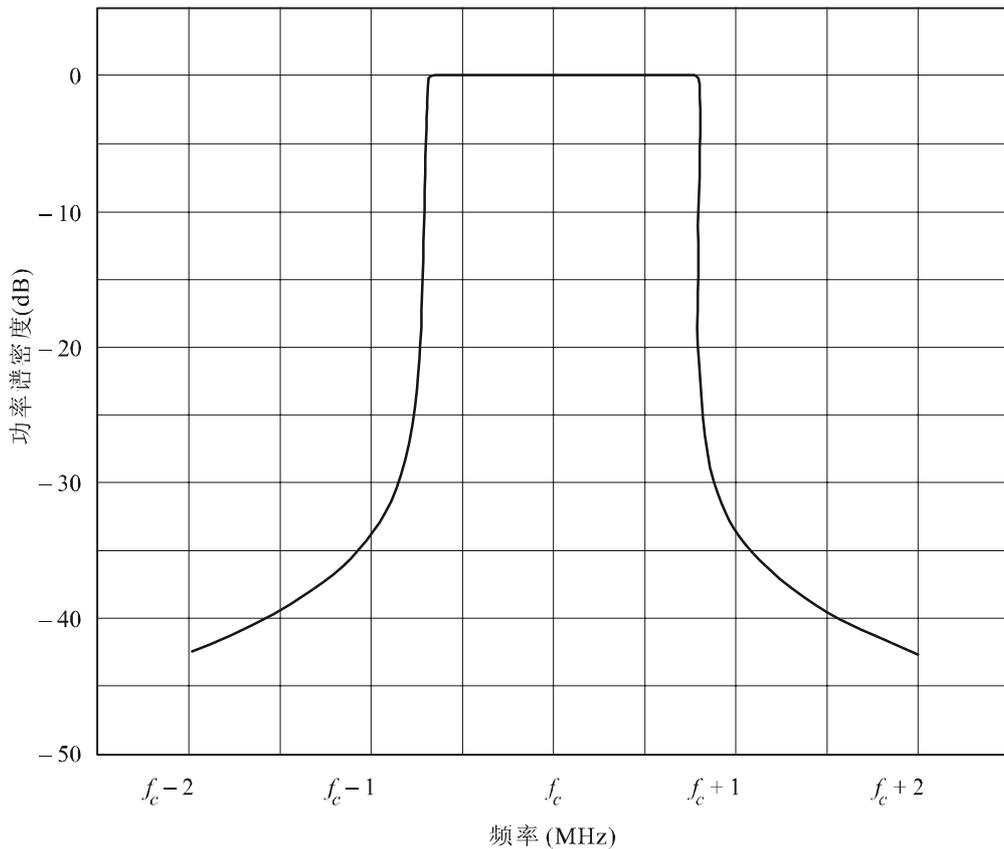
由于回波对所接收信号的作用，所有类型的接收机（例如便携式的、家用的和车载的）都可以采用简单的、非定向的天线。

9.6 系统 A 的传输信号频谱

例如，对于传输模式 II，系统 A 的理论频谱如图 6 所示。

图 6

系统 A 传输模式 II 理论上的传输信号频谱



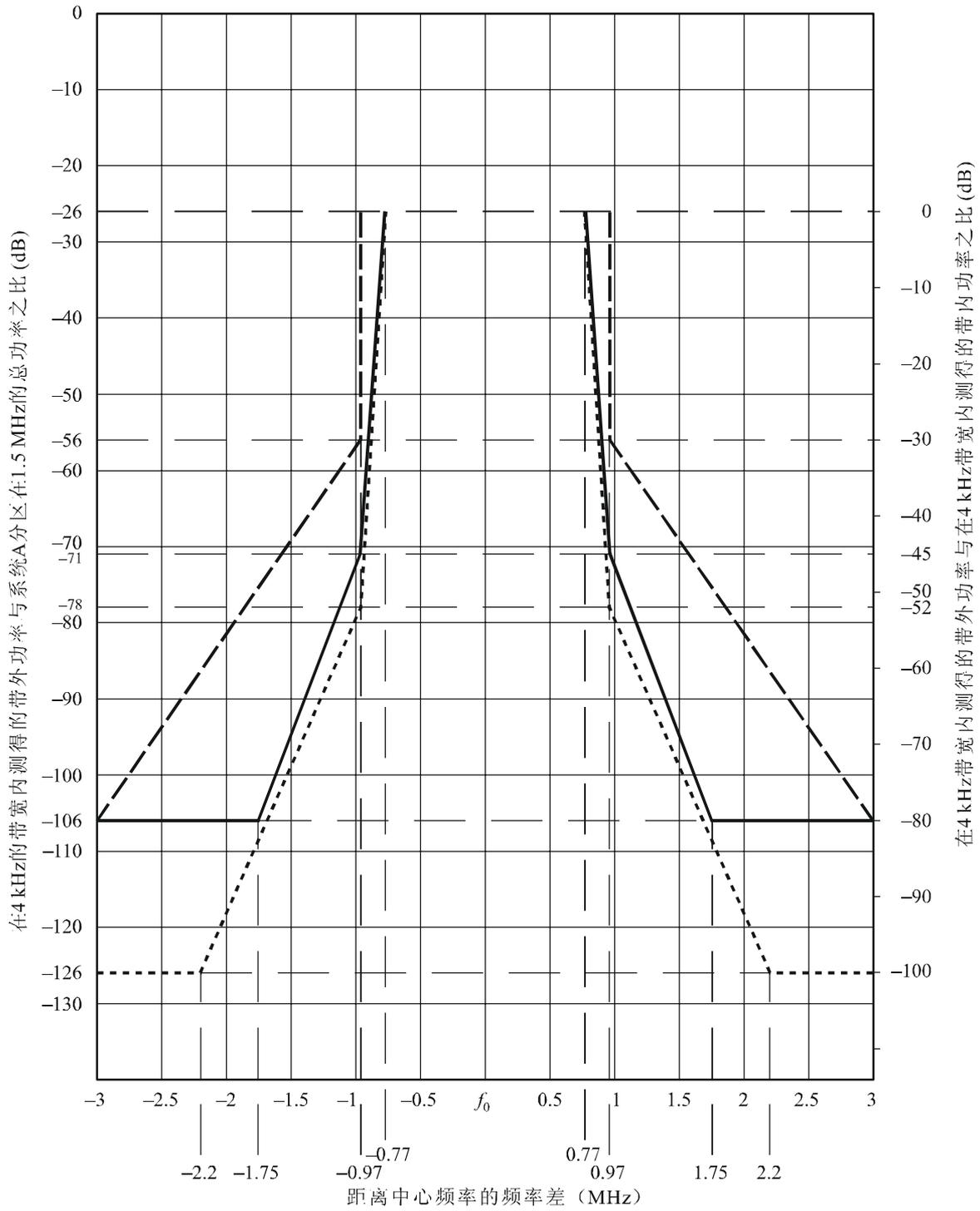
f_c : 信道中心频率

1114-06

在任何 4 kHz 的频带内带外辐射信号的频谱应受到图 7 中定义的一种掩模的限制。

图 7

系统 A 传输信号的带外频谱掩模



- 适用于工作在非临界状况或者1.5 GHz频带内的VHF系统A发射机的频谱掩模
- 适用于工作在临界状况的VHF系统A发射机的频谱掩模
- 适用于在某些使用频率分区12D的区域上工作的VHF系统A发射机的频谱掩模

实线掩模应适用于工作在临界状况的 VHF 发射机，虚线掩模应适用于工作在非临界情况或者 1.5 GHz 频带内的 VHF 发射机，点划线掩模应适用于在某些采用频率分区 12D 的区域上工作的 VHF 发射机。

通过应用适当的滤波，可以降低信号在正常 1.536 MHz 带宽以外频率上的电平。

表 5

系统 A 传输信号的频带外频谱表

	相对于 1.54 MHz 信道中心的频率 (MHz)	相对电平 (dB)
适用于工作在非临界状况或者 1.5 GHz 频带内的 VHF 系统 A 发射机的频谱掩模	± 0.97	-26
	± 0.97	-56
	± 3.0	-106
适用于工作在临界状况的 VHF 系统 A 的频谱掩模	± 0.77	-26
	± 0.97	-71
	± 1.75	-106
	± 3.0	-106
适用于在某些采用频率分区 12D 的区域上工作的 VHF 系统 A 发射机的频谱掩模	± 0.77	-26
	± 0.97	-78
	± 2.2	-126
	± 3.0	-126

10 系统 A 的 RF 性能特性

针对代表移动的和固定的接收的各种情况，已经在系统 A 上采用模式 I 在 266 MHz、采用模式 II 在 1480 MHz 进行了 RF 评估测试。在数据信道上进行传输信道误码率对比 S/N 的测量采用下列条件：

$$D = 64 \text{ kbit/s}, \quad R = 0.5$$

$$D = 24 \text{ kbit/s}, \quad R = 0.375$$

其中：

D ：信源数据速率

R ：平均信道编码率。

10.1 高斯信道中的 BER 对比 S/N （在 1.5 MHz）

加入加性高斯白噪声设置接收机入口处的 S/N ，结果如图 8 和图 9 所示。例如，当 $R = 0.5$ 时，图 8 中的测量结果能够与那些通过软件仿真得到的结果进行比较，以显示系统的固有性能。可以看出当 BER 为 1×10^{-4} 时，可以获得不到 1.0 dB 的实现余量。

图 8
系统 A 的 BER 对比 S/N
(传输模式 I) — 高斯信道

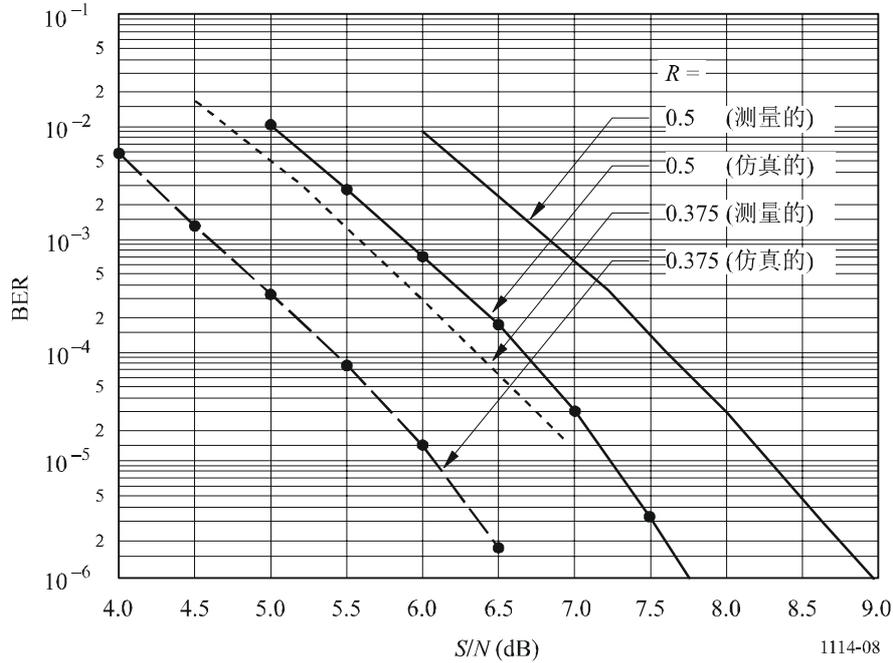
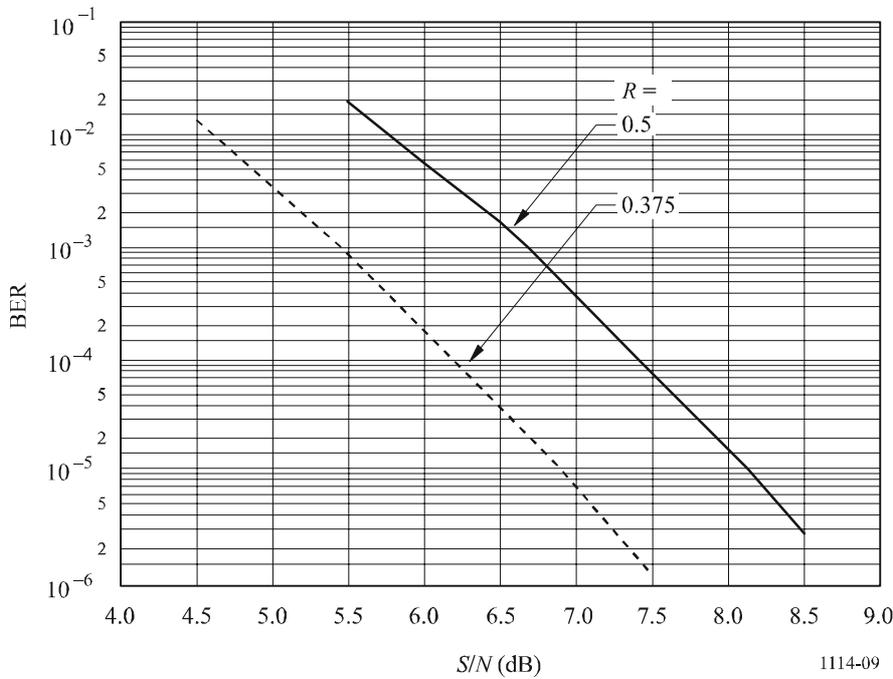


图 9
系统 A 的 BER 对比 S/N
(传输模式 II 或 III)：高斯信道



10.2 模拟城市环境的瑞利信道中的 BER 对比 S/N (在 1.5 MHz)

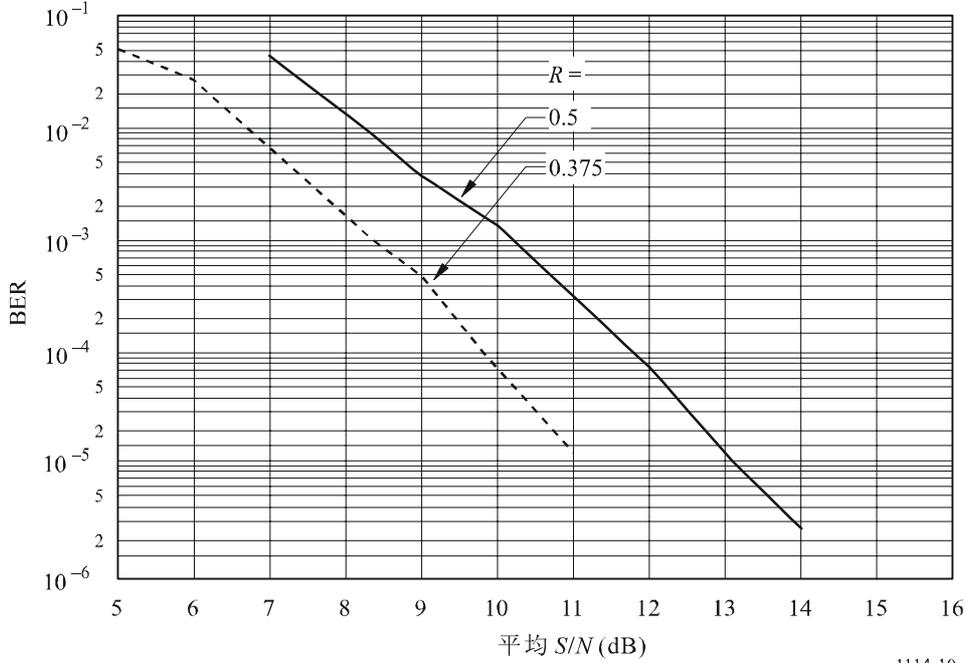
在数据信道上使用衰落信道模拟器进行 BER 对比 S/N 的测量，瑞利信道仿真与 Cost 207 文档中的图 5 (典型城区, 0-0.5 μ s) 相对应，接收机以 15 km/h 的速度移动。

结果如图 10 和图 11 所示。

图 10

系统 A 的 BE 对比 S/N
(传输模式 I, 266 MHz)

模拟的瑞利信道 (城市环境, 速度为 15 km/h)

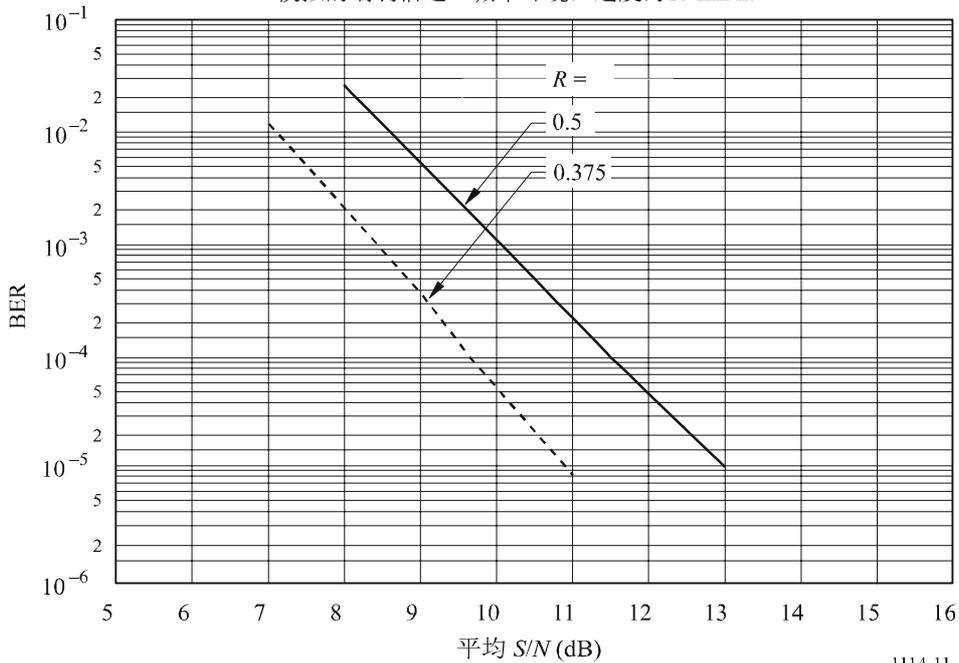


1114-10

图 11

系统 A 的 BER 对比 S/N
(传输模式 II, 1480 MHz)

模拟的瑞利信道 (城市环境, 速度为 15 km/h)



1114-11

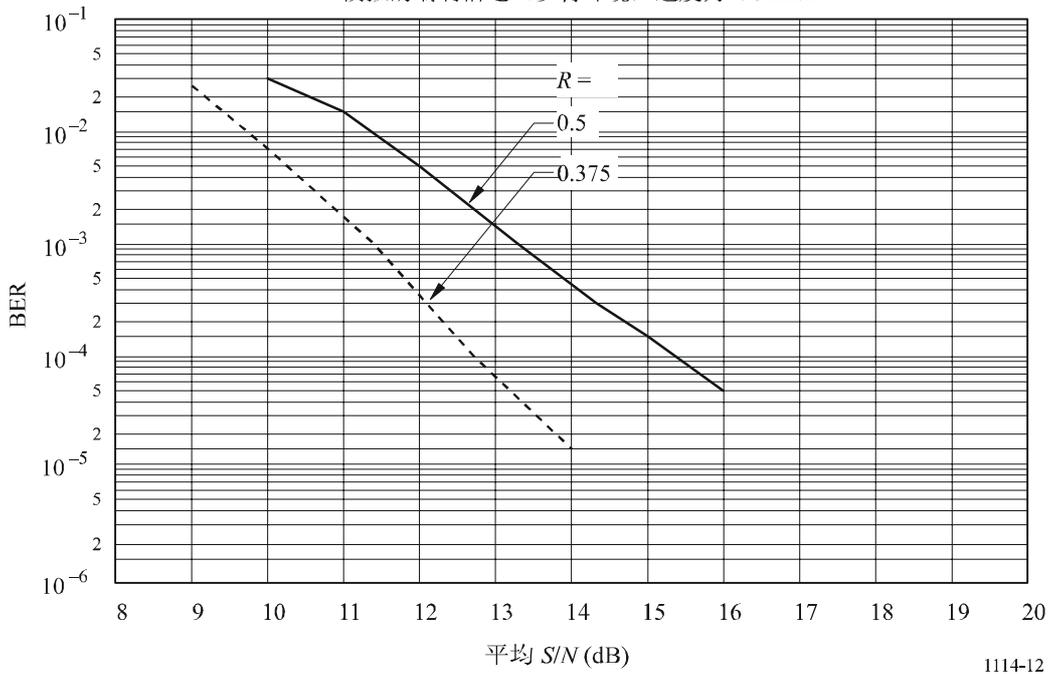
10.3 模拟乡村环境的瑞利信道中的 BER 对比 S/N (在 1.5 MHz)

在数据信道上使用衰落信道模拟器进行 BER 对比 S/N 的测量是，瑞利信道模拟与 Cost 207 文档中的图 4 (乡村地区，非丘陵，0-5 μs) 相对应，接收机以 130 km/h 的速度移动。结果如图 12 所示。

图 12

系统 A 的 BER 对比 S/N
(传输模式 I, 266 MHz)

模拟的瑞利信道 (乡村环境, 速度为 130 km/h)

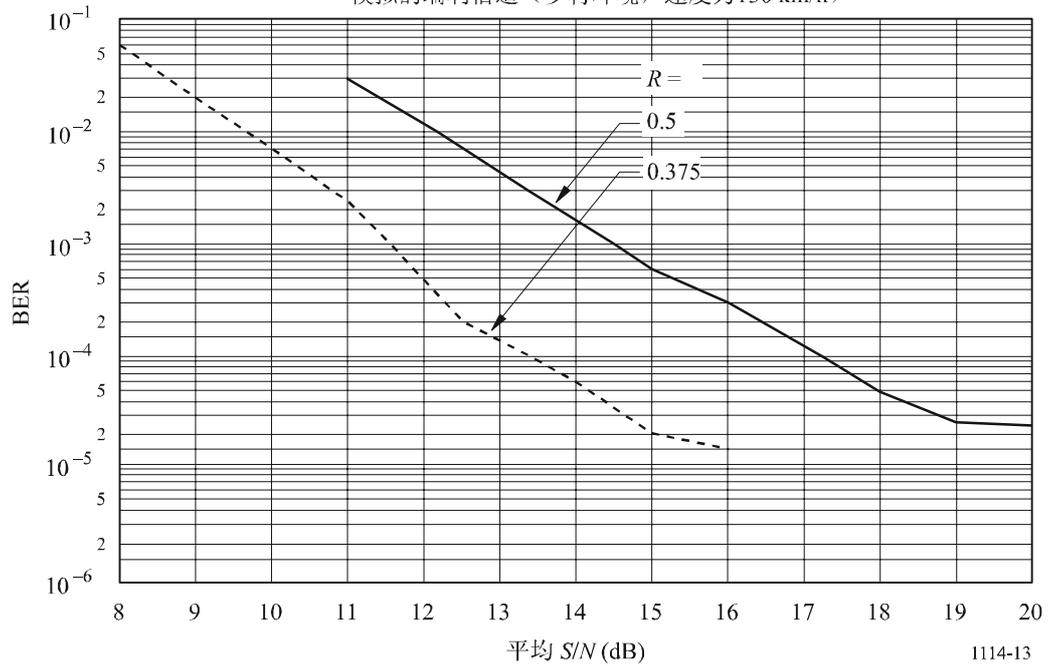


1114-12

图 13

系统 A 的 BER 对比 S/N
(传输模式 II, 1480 MHz)

模拟的瑞利信道 (乡村环境, 速度为 130 km/h)



1114-13

10.4 音质对比 RF S/N

为了评价音质对比 S/N，已经进行了大量的主观评估。传输路径包括在高斯信道中建立 S/N 的设备，在瑞利信道中使用衰落信道模拟器，在瑞利信道的情况下使用两种不同的模拟“模型”，这两种模型与第 10.2 节和第 10.3 节中描述的那些模型相同。

对于每一种情况，在平均 S/N 按 0.5 dB 的步幅递减的情况下进行听力测试，直至依次发生下面两种情况：

- 质量开始下降，是错误的影响开始变得明显的临界点，这定义为在大约 30 s 的周期内听到 3 个或 4 个与错误有关事件的临界点；
- 失败的临界点，是由于节目变得不可理解或者不再提供所寻求的快乐，收听者有可能停止收听节目的临界点，这定义为与错误有关的事件实际上连续地发生、并且在大约 30 s 的周期内出现 2 次或者 3 次听不到声音的临界点。

对于每次测试记录下两个 S/N 数值，代表音频工程师小组的一致意见。呈现在这里的结果是采用不同节目素材进行多次测试的平均值。

表 6
系统 A 的音质对比 S/N
(传输模式 I)：高斯信道

信源编码		信道编码 平均编码率	质量开始下降 S/N (dB)	失败的临界点 S/N (dB)
比特率 (kbit/s)	模式			
256	立体声	0.6	7.6	5.5
224	立体声	0.6	8.3	5.9
224	立体声	0.5	7.0	4.8
224	联合立体声	0.5	6.8	4.5
192	联合立体声	0.5	7.2	4.7
64	单声道	0.5	6.8	4.5

表 7
系统 A 的音质对比 S/N
(传输模式 II 或 III)：高斯信道

信源编码		信道编码 平均编码率	质量开始下降 S/N (dB)	失败的临界点 S/N (dB)
比特率 (kbit/s)	模式			
256	立体声	0.6	7.7	5.7
224	立体声	0.6	8.2	5.8
224	立体声	0.5	6.7	4.9
224	联合立体声	0.5	6.6	4.6
192	联合立体声	0.5	7.2	4.6
64	单声道	0.5	6.9	4.5

表 8
系统 A 的音质对比 S/N 模拟的瑞利信道
(224 kbit/s 立体声, 编码率 0.5)

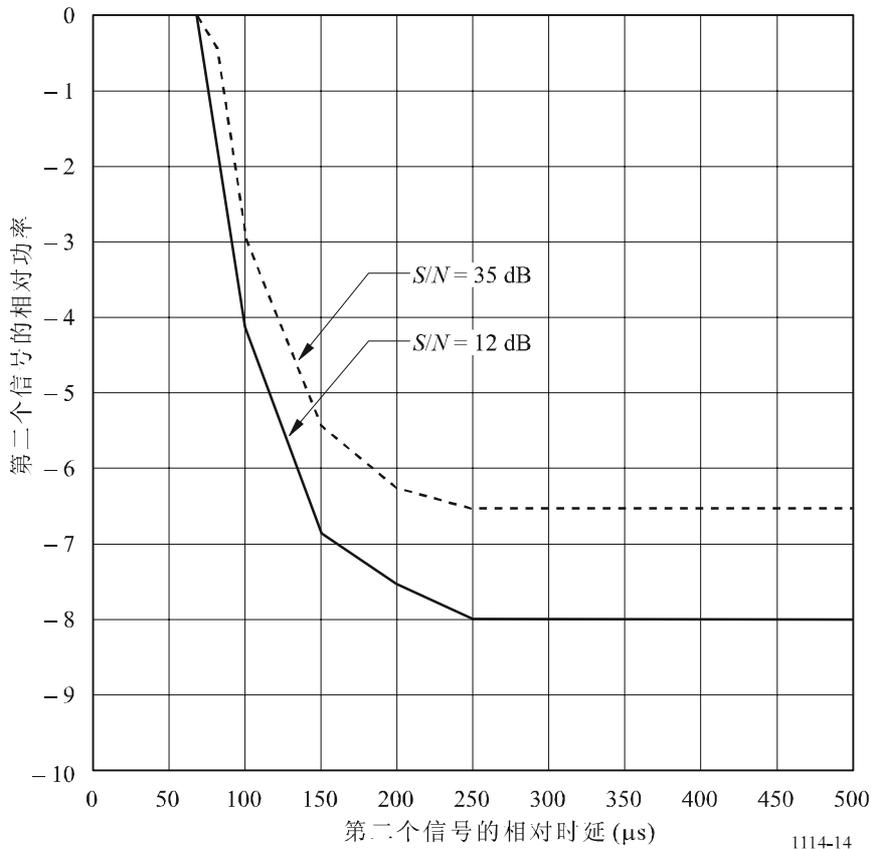
模 式	频率 (MHz)	信道模式	速度 (km/h)	质量开始下降 S/N (dB)	失败的临界点 S/N (dB)
I	226	城市	15	16.0	9.0
II	1 500	城市	15	13.0	7.0
I	226	乡村	130	17.6	10.0
II	1 500	乡村	130	18.0	10.0

10.5 在单频网络中运行的能力

系统 A 信号（传输模式 II）经过信道模拟器的处理产生两种样式的信号：一种代表通过一个基准接收到的信号，基准为具有恒定功率没有时延的传输路径，一种代表在单频网络中来自第二个发射机的延迟信号（或者某些其它的长时延回波），施加到第二个信号的多普勒频移与系统 A 的能力限制相一致，将总的接收信号 S/N 设为 12 dB 和 35 dB，进行两组测试。在比特率为 64 bit/s、编码率为 0.5 的数据信道上，测量在 BER 为 1×10^{-4} 的情况下时延增加时第二个、延迟信号的相对功率，结果如图 14 所示。

在传输模式 II 中，保护间隔的大小为 64 μ s，因此结果表明只要第二个信号落在保护间隔内就不会引起质量下降。

图 14
系统 A 单频能力举例
(传输模式 II)



附件 3

数字系统 F

1 引言

数字系统 F (系统 F), 也被称作 ISDB-T_{SB} 系统, 被设计成提供具有可靠性的高质量声音和数据广播, 甚至在移动接收的情况下。系统 F 也被设计成使用地面网络为多媒体广播提供灵活性、扩展性和通用性, 并符合 ITU-R BS.774 建议书给出的系统要求。

系统 F 是一个采用 OFDM 调制、二维频率-时间交织和级联纠错码的牢靠系统, 在系统中采用的 OFDM 调制被称为频带分段传输 (BST)-OFDM, 系统 F 与用于数字地面电视广播的 ISDB-T 系统在物理层有共同之处, 被称作 OFDM 段的 OFDM 区的带宽大约为 500 kHz, 系统 F 由 1 个或 3 个 OFDM 段组成, 因此系统的带宽大约为 500 kHz 或者 1.5 MHz。

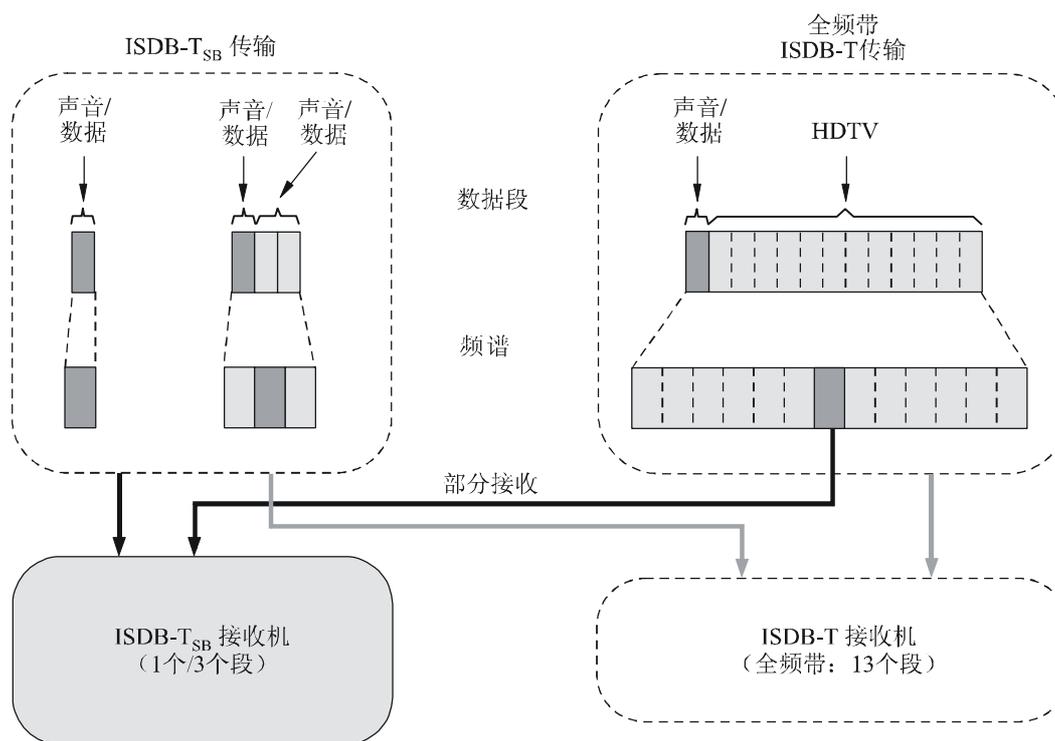
系统 F 有大量的传输参数，例如载波调制体制、内部纠错码的编码率、时间交织的长度。一些载波被指定为发送关于传输参数的信息的控制载波，这些控制载波被称作 TMCC 载波。

系统 F 能够采用高压缩的音频编码方法，例如 MPEG-2 第 II 层、AC-3 和 MPEG-2 AAC。并且，该系统采用 MPEG-2 系统，它与许多采用 MPEG-2 系统的其它系统例如 ISDB-S、ISDB-T、DVB-S 和 DVB-T 具有通用性和互操作性。

图 15 所示的是 ISDB-T_{SB} 和全频带 ISDB-T 传输概念和它的接收。

图 15

ISDB-T_{SB} 和全频带 ISDB-T 传输概念和它的接收



HDTV:

1114-15

2 系统 F 的属性

2.1 系统 F 的牢靠性

系统 F 采用 OFDM 调制、二维频率 — 时间交织和级联纠错码。OFDM 是多载波调制方式，是一种抗多径的调制方式，尤其是在时域中增加了一个保护间隔。传输的消息通过交织扩展在频域和时域上，然后通过维特比和里德—所罗门 (RS) 解码器来校正信息，因此在接收机端可以获得高质量的信号，即便在严重多径传播的情况下工作，无论固定还是移动。

2.2 传输的广泛变化

系统 F 采用 BST-OFDM，包括 1 个或 3 个 OFDM 段，即单段传输和三段传输。取决于基准信道光栅为 6、7 或 8 MHz，OFDM 段的带宽定义为三种情况之一，带宽是基准信道带宽（6、7 或 8 MHz）的十四分之一，即 429 kHz（6/14 MHz）、500 kHz（7/14 MHz）或者 571 kHz（8/14 MHz）。OFDM 段的带宽应根据各个国家的频率情况进行选择。

单段的带宽大约为 500 kHz，因此单段传输和三段传输的带宽大约为 500 kHz 和 1.5 MHz。

系统 F 具有三种可供选择的传输模式允许使用大范围的发送频率，关于 SFN 发射机之间距离的设计有四种可供选择的保护间隔长度。对于存在多径回波时的移动接收，这些传输模式已经被设计成能够处理多普勒扩展和时延延长。

2.3 灵活性

系统 F 的复用结构完全符合 MPEG-2 系统体系结构，因此各种数字内容例如声音、文本、静图和数据能够同时传输。

另外，根据广播公司的意图，他们可以选择系统的载波调制方式、纠错编码率、时间交织长度等。有 DQPSK、QPSK、16-QAM 和 64-QAM 四种载波调制方式，1/2、2/3、3/4、5/6 和 7/8 五种编码率，从 0 到大约 1 s 五种时间交织长度。TMCC 载波把表示系统采用的调制方式类型和编码率的信息传送到接收机。

2.4 通用性和互操作性

系统 F 使用 BST-OFDM 调制，并采用 MPEG-2 系统，因此，系统与用于数字地面电视广播的 ISDB-T 系统在物理层有共同之处，与在传输层采用 MPEG-2 系统的系统例如 ISDB-T、ISDB-S、DVB-T 和 DVB-S 有共同之处。

2.5 高效的传输和信源编码

系统 F 采用高频谱利用率的调制方式 OFDM，并且，它允许使用附加的全部工作在相同辐射频率上的发射机来对频率复用广播网络进行扩展。

另外，只要信道之间的频率和位同步保持相同，独立广播公司的信道能够在没有保护带的情况下由相同的发射机一起发送。

系统 F 能够采用 MPEG-2 AAC，比特率为 144 kbit/s 的立体声能够获得接近 CD 的音质。

2.6 广播公司的独立性

至少对于一个声音节目的传输而言，系统是一个窄带系统，因此广播公司能够拥有他们自己的 RF 信道，在这个信道中他们能够独立地选择传输参数。

2.7 低功耗

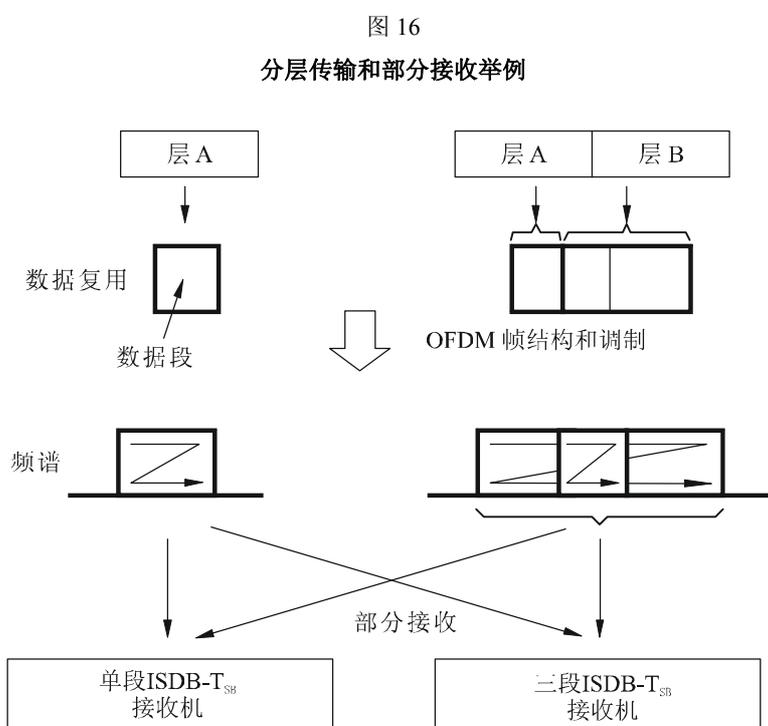
通过开发 LSI 芯片，几乎所有的设备都能够做小、做轻。减少电池尺寸的努力的最重要方面是设备的功耗必须低。系统时钟越低，功耗越低，因此，窄带、低比特率的系统如单段传输能够允许接收机是便携和轻便的。

2.8 分层传输和部分接收

在分段传输中，可以实现单层的传输和分层的传输，在分层传输中有 A 和 B 两层，载波调制体制、内码的编码率和时间交织的长度等传输参数在不同的层可以改变。

单段接收机能够接收分层传输的中间段，由于 OFDM 段的共同结构，只要在中间段中传输一个独立的节目，单段接收机就能部分地接收全频带 ISDB-T 的中间段。

图 16 所示的是分层传输和部分接收举例。



3 传输参数

可以给系统 F 分配 6 MHz、7 MHz 或 8 MHz 的信道光栅，段的带宽定义为信道带宽的十四分之一，因而就是 429 kHz (6/14 MHz)、500 kHz (7/14 MHz) 或 571 kHz (8/14 MHz)。然而，段的带宽应根据各个国家的频率情况进行选择。

ISDB-T_{SB} 系统的传输参数如表 9 所示。

表 9
ISDB-T_{SB} 的传输参数

模 式		模式 1	模式 2	模式 3
段的总数 ⁽¹⁾ ($N_s = n_d + n_c$)		1, 3		
基准信道光栅 (BW_f) (MHz)		6, 7, 8		
段带宽 (BW_s) (kHz)		$BW_f \times 1\,000/14$		
已用的带宽 (BW_u) (kHz)		$BW_s \times N_s + C_s$		
用于差分调制的段的数量		n_d		
用于相干调制的段的数量		n_c		
载波间隔 (C_s) (kHz)		$BW_s/108$	$BW_s/216$	$BW_s/432$
载波数量	总数	$108 \times N_s + 1$	$216 \times N_s + 1$	$432 \times N_s + 1$
	数据	$96 \times N_s$	$192 \times N_s$	$384 \times N_s$
	SP ⁽²⁾	$9 \times n_c$	$18 \times n_c$	$36 \times n_c$
	CP ⁽²⁾	$n_d + 1$	$n_d + 1$	$n_d + 1$
	TMCC ⁽³⁾	$n_c + 5 \times n_d$	$2 \times n_c + 10 \times n_d$	$4 \times n_c + 20 \times n_d$
	AC1 ⁽⁴⁾	$2 \times N_s$	$4 + N_s$	$8 \times N_s$
	AC2 ⁽⁴⁾	$4 \times n_d$	$9 \times n_d$	$19 \times n_d$
载波调制		DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM		
每帧的符号数		204		
有用的符号持续时间 (T_u) (μ s)		$1\,000/C_s$		
保护间隔持续时间 (T_g)		T_u 的 1/4, 1/8, 1/16 或 1/32		
总的符号持续时间 (T_s)		$T_u + T_g$		
帧持续时间(T_f)		$T_s \times +204$		
FFT 样本(F_s)		256 ($N_s = 1$) 512 ($N_s = 3$)	512 ($N_s = 1$) 1024 ($N_s = 3$)	1024 ($N_s = 1$) 2048 ($N_s = 3$)
FFT 采样时钟(F_{sc}) (MHz)		$F_{sc} = F_s/T_u$		
内码		卷积码 (编码率 = 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8) (母码= 1/2)		
外码		(204,188) RS 码		
时间交织参数 (I)		0, 4, 8, 16, 32	0, 2, 4, 8, 16	0, 1, 2, 4, 8
时间交织的长度		$I \times 95 \times T_s$		

FFT: 快速傅里叶变换

- (1) 对于声音业务, 系统 F 采用 1 或 3 段, 然而对于其它业务例如电视业务, 可以采用任何数量的段。(对比 ITU-R BT.1306 建议书的系统 C)
- (2) SP (分散的导频) 和 CP (连续的导频) 可以用于频率同步和信道估计, CP 的数量包含所有段上的 CP 和作为整个带宽上边界的一个 CP。
- (3) TMCC 传送关于传输参数的信息。
- (4) AC (辅助信道) 传送网络运行的辅助信息。

4 信源编码

系统 F 复用结构完全符合 MPEG-2 系统体系结构，因此能够发送包含压缩音频信号的 MPEG-2 运输流数据包 (TSP)。能够在系统 F 中应用数字音频压缩方式例如在 ISO/IEC 13818-3 中规定的 MPEG-2 第 II 层音频、AC-3(在 ATSC A/52 文档中规定的数字音频压缩标准)和在 ISO/IEC 13818-7 中规定的 MPEG-2 AAC。

5 多路复用

系统 F 的多路复用符合 MPEG-2 TS ISO/IEC 13818-1，另外，为采用单个 TS 的分层传输定义了复用帧和 TMCC 描述符。

考虑到多个数字广播系统之间最大的协作，例如在 ITU-R BO.1408 建议书中推荐的 ISDB-S，在 ITU-R BT.1306 建议书中推荐的 ISDB-T (系统 C) 以及在 ITU-R BO.1130 建议书中推荐的使用 2.6 GHz 频带的卫星广播业务 (声音) 系统 (系统 E)，这些系统能够通过这个接口与其它广播系统交换广播数据流。

5.1 复用帧

为了使用 BST-OFDM 体制实现分层传输，ISDB-T_{SB} 系统在 MPEG-2 系统范围内定义了 TS 复用帧，在复用帧中，TS 是一个连续的由 188 字节的 TSP 和 16 字节的空数据或者 RS 奇偶校验组成的 204 字节 RS-TSP 流。

在单段传输的情况下，采用比反向 FFT (IFFT) 采样时钟快两倍的时钟对 RS-TSP 进行计数，把复用帧的持续时间调整为 OFDM 帧的持续时间，在分段传输的情况下，采用比 IFFT 采样时钟快四倍的时钟对 RS-TSP 进行计数，把复用帧的持续时间调整为 OFDM 帧的持续时间。

6 信道编码

本节描述的是信道编码单元，该单元接收排列在复用帧中的数据包，把信道编码过的数据块转发到 OFDM 调制单元。

6.1 信道编码的功能框图

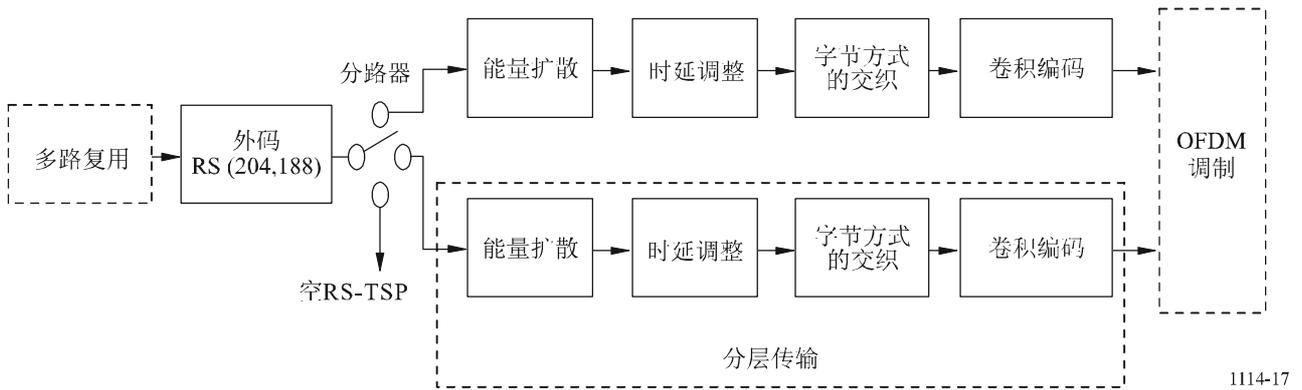
图 17 所示的是 ISDB-T_{SB} 系统信道编码的功能框图。

采用比前一节描述的 IFFT 采样速率快的时钟，对复用帧的字节进行计数，使复用帧的持续时间与 OFDM 帧的持续时间一致。

在复用单元与外码单元之间的接口，复用帧的报头字节 (相当于 TSP 的同步字节) 被当作 OFDM 帧的报头字节。在位方式的描述中，报头字节的最高有效位被当作 OFDM 帧的同步位。

对于三段分层传输，根据传输控制信息把 RS-TSP 流分为两层，在每一层可以独立地规定内部纠错码的编码率、载波调制体制和时间交织长度。

图 17
信道编码图



6.2 外码

把 RS(204,188) 缩短码应用于 MPEG-2 TSP 产生差错防护的 TSP 即 RS-TSP, RS (208,188) 码能够纠正接收到的 204 字节中可达 8 个的随机错误字节。

域生成多项式: $p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$

码生成多项式: $g(x) = (x - \lambda^0)(x - \lambda^1)(x - \lambda^2)(x - \lambda^3) \cdots (x - \lambda^{15})$

其中: $\lambda = 02_h$

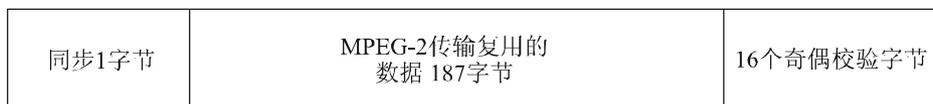
应注意到来自复用器的空 TSP 也被编入 RS(204,188) 数据包。

MPEG-2 TSP 和 RS-TSP (RS 差错防护的 TSP) 如图 18 所示。RS 差错防护的 TSP 也被称作传输 TSP。

图 18
MPEG-2 TSP 和 RS-TSP (传输 TSP)



a) MPEG-2 TSP



b) RS-TSP (传输 TSP), RS (204, 188) 差错防护 TSP

1114-18

6.3 能量扩散

为了保证足够的二进制变换, 采用伪随机二进制序列 (PRBS) 把来自分路器的数据随机化。

PRBS 发生器的多项式应为:

$$g(x) = x^{15} + x^{14} + 1$$

6.4 时延调整

在字节方式交织中，取决于流的特性（如调制和信道编码），不同层的流因交织过程产生的时延各不相同。为了补偿包含接收机去交织在内的时延差异，发送端要在字节方式交织之前进行时延调整。

6.5 字节方式交织（内码交织）

对 204 字节差错防护和随机化的数据包采取长度 $I = 12$ 卷积字节方式的交织，交织可能包括 $I = 12$ 个分支，通过输入开关循环地接到输入字节流，每个分支 j 应是长度为 $j \times 17$ 字节的先入先出（FIFO）移位寄存器，FIFO 的单元应能容纳 1 个字节，输入开关和输出开关应同步。

去交织基本上同交织类似，但保留分支索引，交织和去交织产生的总的时延为 $17 \times 11 \times 12$ 字节（相当于 11 个 TSP）。

6.6 内部编码（卷积码）

系统 F 应允许采用一系列以编码率为 1/2、具有 64 个状态的母卷积码为基础的截短卷积码，卷积码的编码率为 1/2、2/3、3/4、5/6 和 7/8。这将允许在 ISDB-T_{SB} 业务包括移动业务中，针对一个特定的业务选择最合适的纠错特性或数据速率，母码的生成多项式为：X 输出时， $G_1 = 171_{\text{oct}}$ ，Y 输出时， $G_2 = 133_{\text{oct}}$ 。

7 调制

调制单元的配置如图 19 和图 20 所示，在位方式的交织以后，各层的数据被映射到复数域。

7.1 位交织的时延调整

位交织产生了 120 个复数数据 $(I + jQ)$ 的时延，如下一节所述。通过增加适当的时延，发射机和接收机中总的时延被调整到两个 OFDM 符号。

7.2 位交织和映射

本系统可以选择 DQPSK、QPSK、16-QAM 和 64-QAM 当中的一种载波调制体制。内部编码器输出端的串行比特序列被转换为 2 比特的并行序列，经过 $\pi/4$ 移相 DQPSK 映射或者 QPSK 映射，通过这种方式输送 n 比特的 I 轴和 Q 轴数据。数字 n 可能取决于硬件实现，对于 16-QAM，序列被转换成 4 比特并行序列，在 64-QAM 中，序列被转换成 6 比特并行序列。在串并转换之后，通过插入最大 120 个比特的时延实现位交织。

7.3 数据段

数据段定义为复数数据的地址表，在这个表中将进行速率转换、时间交织和频率交织。数据段相当于 OFDM 段的数据部分。

图 19
调制方框图

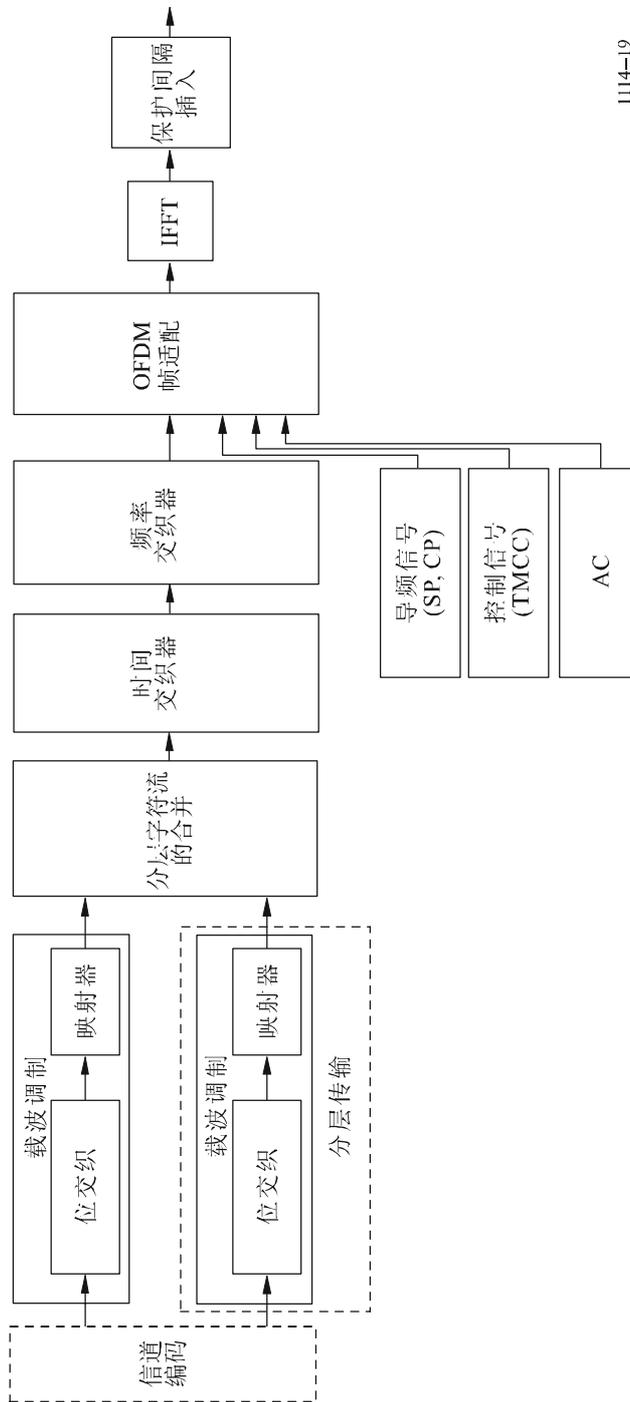
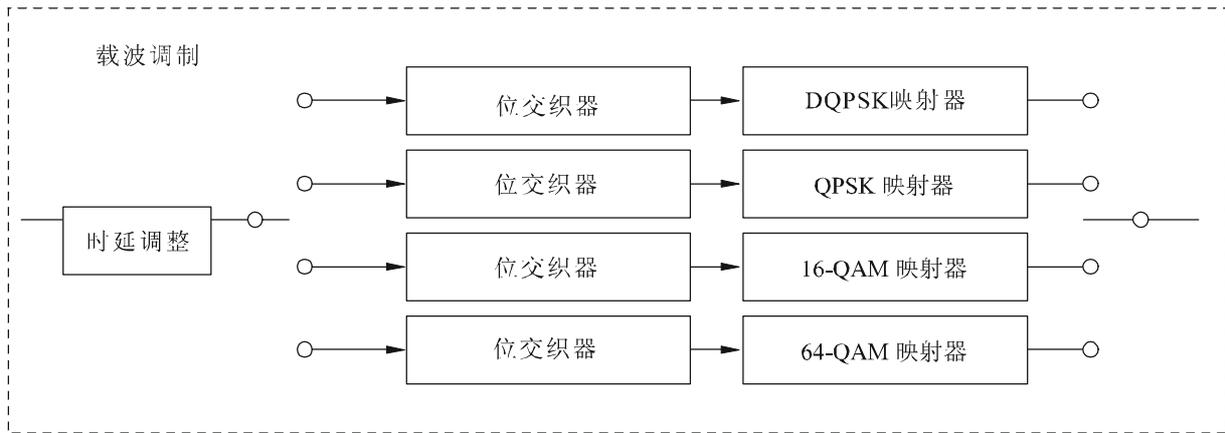


图 20
载波调制单元的配置



1114-20

7.4 分层数据流的合并

在信道编码和映射以后，各层的复数数据每隔一个字符输入到预先指定的数据段。

以 IFFT 采样时钟循环地读出存储在所有数据段中的数据；然后进行速率转换和分层数据流的合并。

7.5 时间交织

在合并以后，进行符号方式的时间交织，时间交织的长度从 0 到大约 1 s 可变，应为各层分别指定时间交织的长度。

7.6 频率交织

频率交织包括段间频率交织、段内载波轮换、段内载波随机化。在具有相同调制体制的段之间进行段间的频率交织，只能对三段传输进行段间频率交织，在载波轮换以后，根据随机化表格实现载波随机化。

7.7 OFDM 段一帧结构

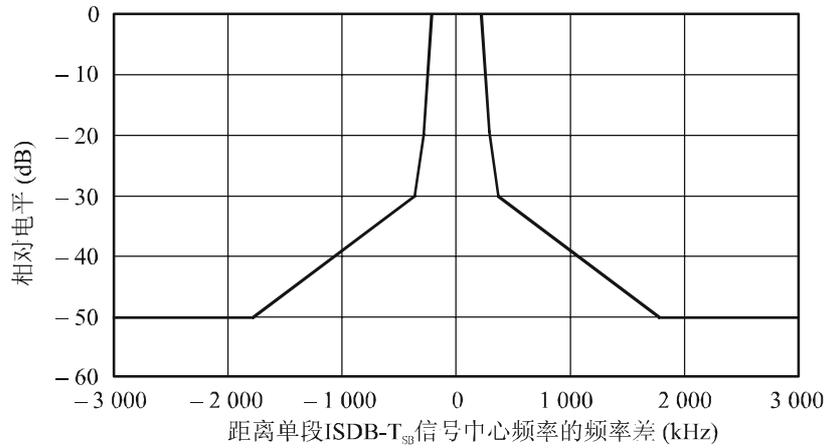
每隔 204 个符号通过增加导频例如 CP、SP、TMCC 和 AC，把数据段安排到 OFDM 段一帧中。在每个 OFDM 符号期间，CP 的调制相位是固定不变的，在相干调制方式的情况下，每隔 12 个载波和每隔 4 个 OFDM 符号就插入 SP。TMCC 载波传送用于接收机控制的传输参数例如载波调制、编码率和时间交织。AC 载波传送辅助信息。

8 频谱掩模

对于 6/14 MHz 段系统，应采用在图 21 和表 10 中规定的掩模对单段传输的辐射信号频谱进行限制，可以应用适当的滤波来降低信号在 429 kHz 频带（6/14 MHz）以外频率上的电平。

图 21

单段 ISDB-T_{SB} 信号的频谱掩模
(段带宽=6/14 MHz)



1114-21

表 10

单段传输频谱掩模的分界点
(段带宽 = 6/14 MHz)

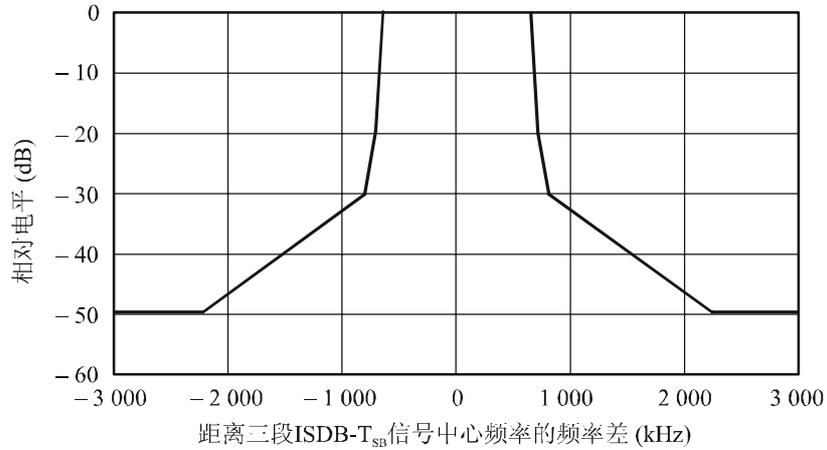
距离传输信号中心频率的频率差 (kHz)	相对电平 (dB)
± 220	0
± 290	-20
± 360	-30
± 1 790	-50

注 1 — 采用频谱分析仪测量辐射信号的频谱。频谱分析仪的分辨带宽应设为 10 kHz 或 3 kHz，至于视频带宽，它在 300 Hz 和 30 kHz 之间，应对视频取平均。频率范围设为测量传输频谱掩模所需的最小值。

图 22 和表 11 规定了用于 6/14 MHz 段系统的三段传输频谱掩模。

注 1 — 应根据系统频谱的形状来修改 7/14 MHz 和 8/14 MHz 段系统的频谱掩模。

图 22
三段 ISDB-T_{SB} 信号的频谱掩模
(段带宽=6/14 MHz)



1114-22

表 11
三段传输频谱掩模的分界点
(段带宽=6/14 MHz)

距离地面数字声音信号中心频率的频率差 (kHz)	相对电平 (dB)
± 650	0
± 720	-20
± 790	-30
± 2 220	-50

9 RF 性能特性

在 ISDB-T_{SB} 系统中已经针对各种各样的传输条件进行了 RF 评估测试，在本节中描述实验室测试的结果。

针对随机噪声和多径衰落，进行关于 BER 性能的实验室传输实验。在下列条件下测量传输信道中的 BER 对比 C/N （见表 12）。

9.1 高斯信道中的 BER 对比 C/N

加入加性高斯白噪声设置接收机输入端的 C/N ，结果如图 23、24 和 25 所示。这些数字能够与那些通过计算机仿真得到的数字进行比较，以显示系统的固有性能。可以看出在 RS 解码之前当 BER 为 2×10^{-4} 时，可以获得不到 1 dB 的实现余量损失。

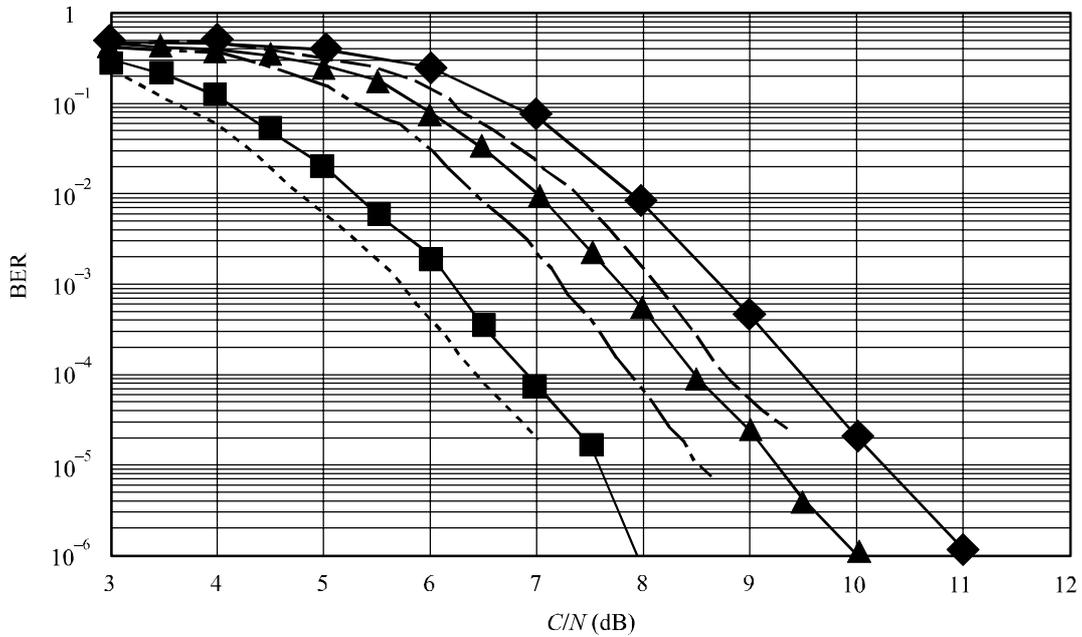
表 12
实验室测试的传输参数

段的数量	1 (带宽: 429 kHz)
传输模式	3 (有用符号的持续时间: 1.008 ms)
载波数量	433
载波调制	DQPSK, 16-QAM 和 64-QAM
保护间隔	63 μs (保护间隔比: 1/16)
内码的编码率	1/2, 2/3, 3/4 和 7/8
时间交织	0 和 407 ms

图 23

RS 编码前的 BER 对比 C/N

(传输模式: 3, 载波调制: DQPSK, 时间交织: 407 ms): 高斯信道



- 编码率: 1/2 (测量的)
- ▲— 编码率: 2/3 (测量的)
- ◆— 编码率: 3/4 (测量的)
- - - 编码率: 1/2 (模拟的)
- · - 编码率: 2/3 (模拟的)
- · - 编码率: 3/4 (模拟的)

图 24

RS 解码前的 BER 对比 C/N

(传输模式: 3, 载波调制: 16-QAM, 时间交织: 407 ms): 高斯信道

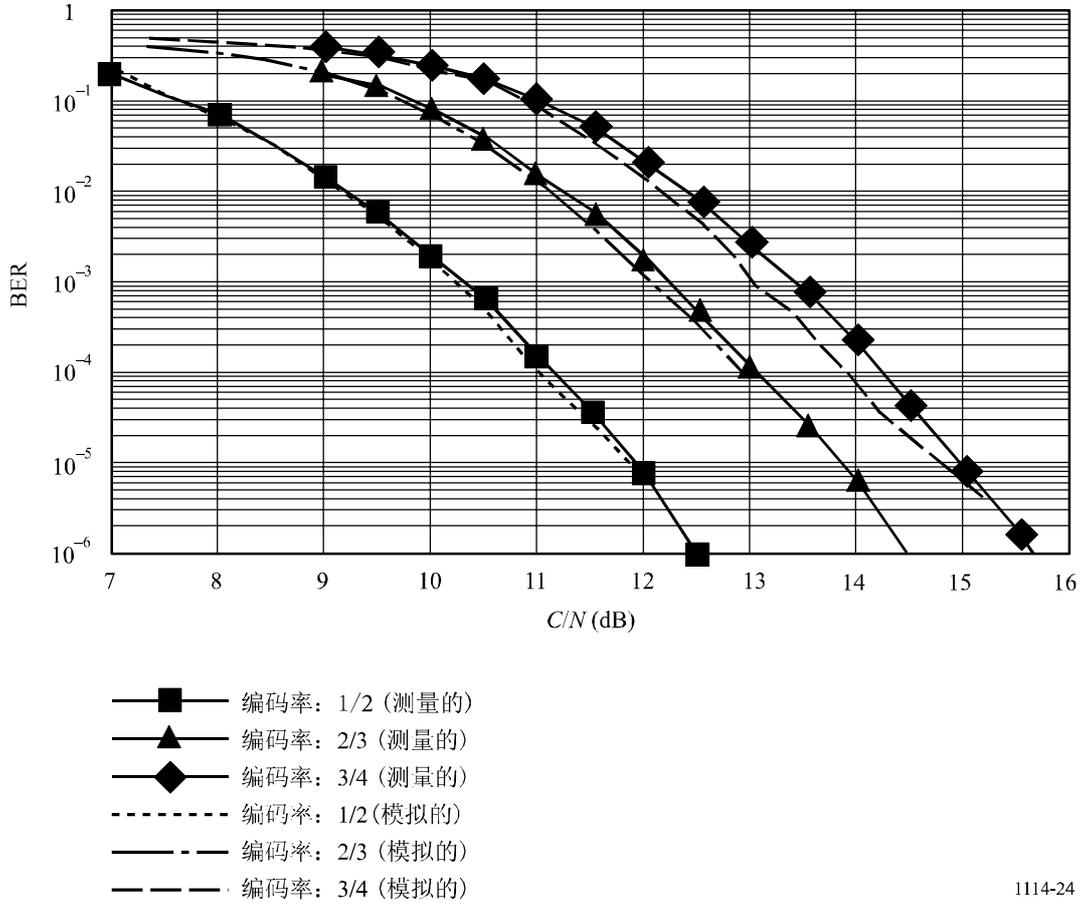
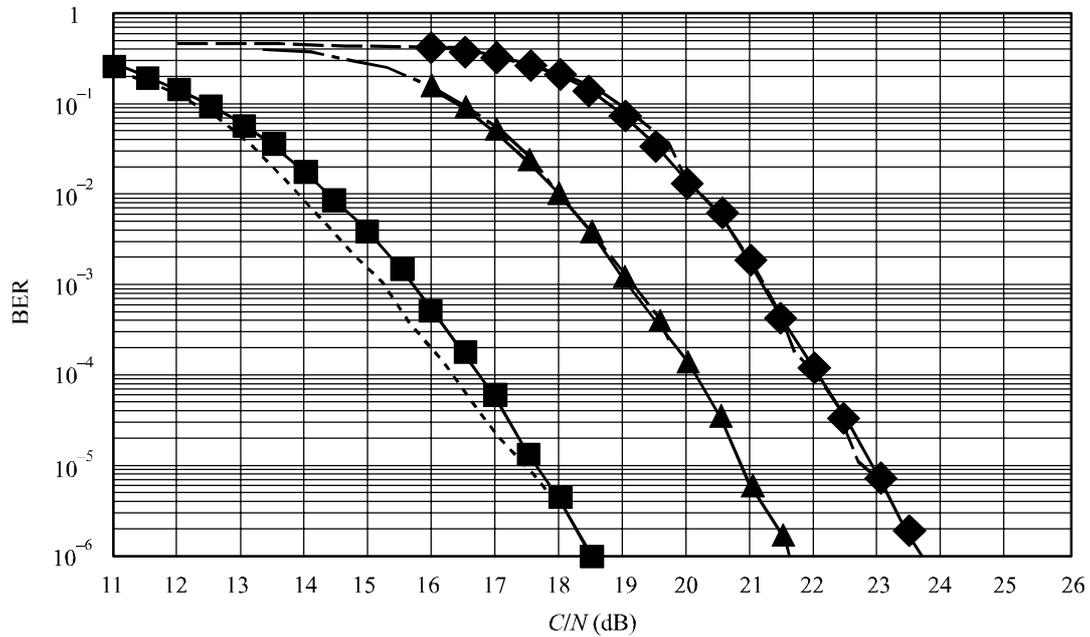


图 25

RS 解码前的 BER 对比 C/N

(传输模式: 3, 载波调制: 64-QAM, 时间交织: 407 ms): 高斯信道



- 编码率: 1/2 (测量的)
- ▲— 编码率: 3/4 (测量的)
- ◆— 编码率: 7/8 (测量的)
- - - 编码率: 1/2 (模拟的)
- · - 编码率: 3/4 (模拟的)
- - - 编码率: 7/8 (模拟的)

1114-25

9.2 多径信道中的 BER 对比 C/N

采用多径信道模拟器来测量 BER 对比 C/N , 主信号和延迟信号的有用信号电平与无用信号或干扰信号电平的比 D/U 设为 3 dB 和 10 dB。延迟信号相对于主信号的延迟时间设为 15 μ s, 结果如图 26 所示。

9.3 瑞利信道中的 BER 对比 C/N

采用衰落信道模拟器来测量 BER 对比 C/N , 信道被设为两路径瑞利衰落信道, 两个路径的 D/U 设为 0 dB。延迟信号的时间设为 15 μ s, 信号的最大多普勒频率设为 5 Hz 和 20 Hz, 结果如图 27 所示。

图 26

RS 解码前的 BER 对比 C/N

(传输模式: 3, 编码率: 1/2, 时间交织: 407 ms): 多径信道

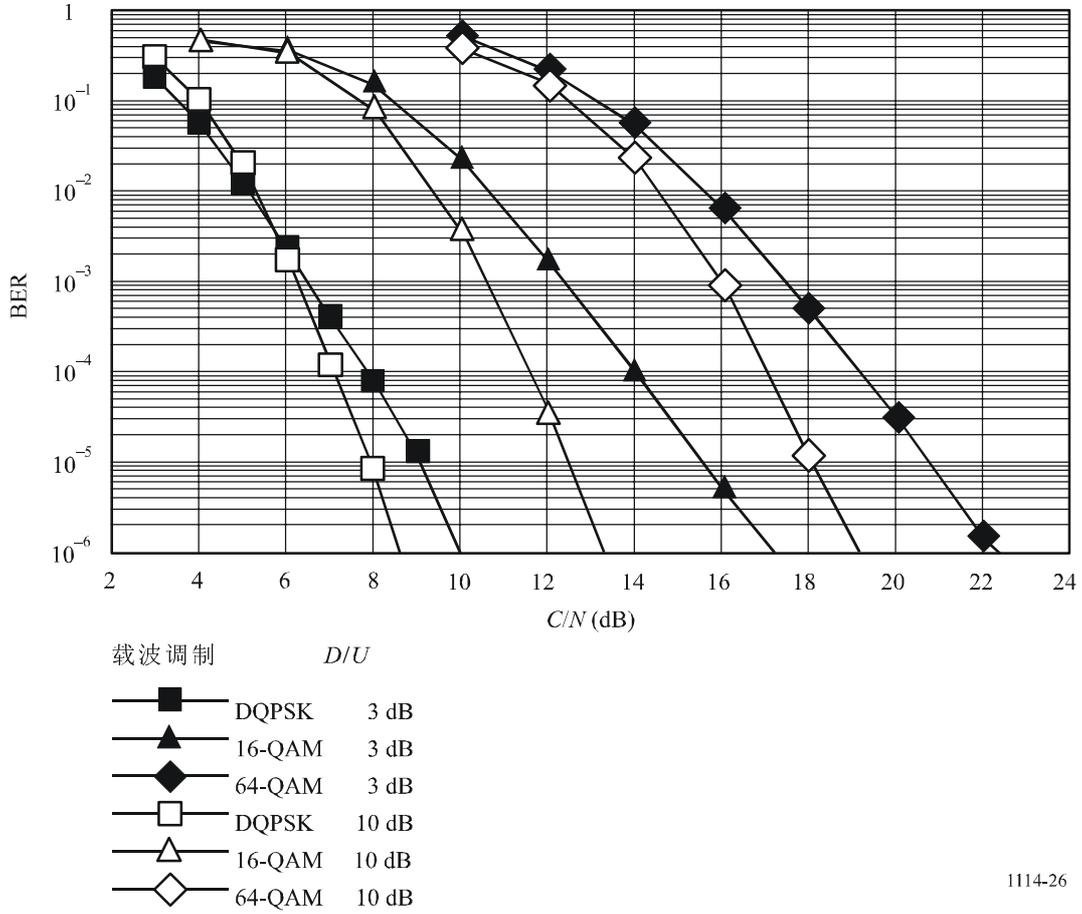
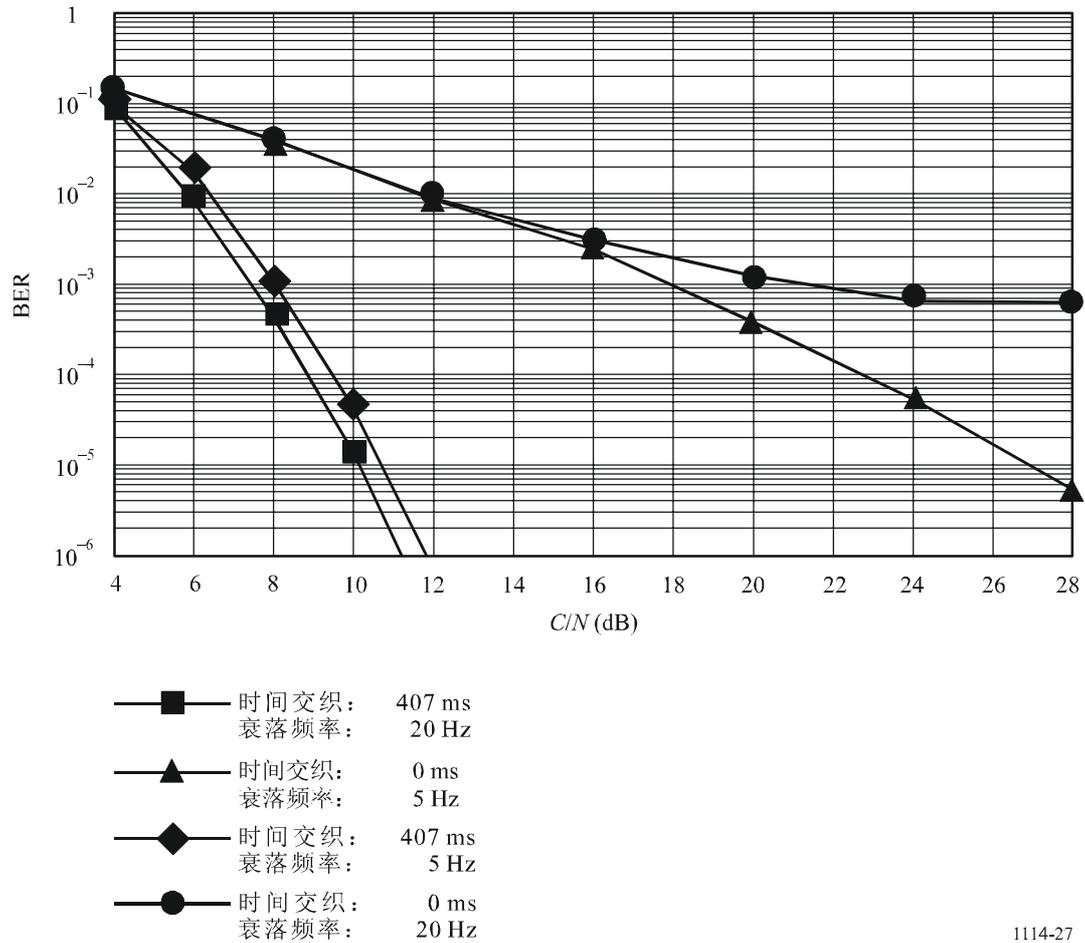


图 27

RS 解码前的 BER 对比 C/N

(传输模式: 3, 载波调制: DQPSK, 编码率: 1/2): 2 个路径的瑞利信道



1114-27

附件 4

数字系统 C

1 系统综述

数字系统 C 采用 IBOC 技术来促进 DSB 的引入, DSB 通过提供增强的音频保真度、改进的信号牢靠性和扩展的辅助业务, 给予了广播公司升级他们的模拟业务的能力, IBOC 技术通过允许现有站点以模拟和数字方式广播相同的节目, 使得广播公司能够在不需要新的用于数字信号的频谱配置的情况下引入这些升级, 这提供了从现有模拟环境合理过渡到数字未来的极为有效的方法。

2 IBOC 层

按照 ISO OSI 分层模型来组织 IBOC 的详细性能说明。广播系统的每一个 OSI 层在接收系统中都有一个对应层，称作对等层。这些层的功能是这样的，底层的联合结果是实现一个特定层和它的在另一侧的对等层之间的虚拟通信。

2.1 混合层 1

数字系统 C 的第 1 层 (L1) 把来自第 2 层 (L2) 的信息和系统控制转换成适于 VHF 频带传输的 IBOC 波形，信息和控制以离散传递帧的方式通过多条逻辑信道穿过 L1 服务访问点 (SAP) 传输，这些传递帧也分别被称作 L2 服务数据单元 (SDU) 和服务控制单元 (SCU)。

L2 SDU 的大小和格式依据服务模式而变化，服务模式，系统控制的一个主要组成部分，决定各个逻辑信道的传输特性。在评估了他们的候选应用的要求之后，较高的协议层选择最适于配置逻辑信道的服务模式，逻辑信道的多重性反映出系统本身的灵活性，能支持不同类别的数字音频和数据的同时传送。

L1 也接收系统控制，例如来自 L2 的 SCU。在系统控制器中处理系统控制。

以下各节介绍：

- 波形和频谱的概述；
- 系统控制的概述，包括可用的服务模式；
- 逻辑信道的概述；
- 包含 L1 FM 空中接口的各个功能部件的高级讨论。

2.2 波形和频谱

通过提供三种新的波形类型：混合、扩展的混合和全数字，本设计提供了一种灵活的引入数字广播系统的方法。混合和扩展的混合类型保留模拟的 FM 信号，而全数字类型则不保留模拟的 FM 信号。全部三种波形都能在指定的频谱辐射屏蔽例如联邦通信委员 (FCC) 会当前规定的频谱辐射屏蔽下很好地工作。

数字信号采用正交频分复用 (OFDM) 调制，OFDM 是一种并行的调制体制，在这种调制体制中数据流调制多个同时发送的正交副载波，OFDM 本来就是灵活的，很容易将逻辑信道映射到不同的副载波组。

符号定时参数如表 13 所示。

2.2.1 混合波形

数字信号在混合波形模拟 FM 信号两侧的第一主 (PM) 边带中传送，各个边带的功率电平大约比模拟 FM 信号的总功率低 23 dB。模拟信号可能是单声道或立体声，可能包含辅助通信授权 (SCA) 信道。

表 13
符号定时参数

参数名称	符号	单位	准确数值	计算值 (4位有效数)
OFDM 副载波间隔	Δf	Hz	1 488 375/4 096	363.4
周期性前缀宽度	α	无	7/128	5.469×10^{-2}
OFDM 符号持续时间	T_s	s	$(1 + \alpha) / \Delta f =$ $(135/128) \cdot (4 096/1 488 375)$	2.902×10^{-3}
OFDM 符号速率	R_s	Hz	$= 1/T_s$	344.5
L1 帧持续时间	T_f	s	$65 536/44 100 = 512 \cdot T_s$	1.486
L1 帧速率	R_f	Hz	$= 1/T_f$	6.729×10^{-1}
L1 块持续时间	T_b	s	$= 32 \cdot T_s$	9.288×10^{-2}
L1 块速率	R_b	Hz	$= 1/T_b$	10.77
L1 块对持续时间	T_p	s	$= 64 \cdot T_s$	1.858×10^{-1}
L1 块对速率	R_p	Hz	$= 1/T_p$	5.383
分集时延帧	N_{dd}	无	=分集时延 L1 帧的数量	3

2.2.2 扩展的混合波形

在扩展的混合波形中，可以朝着模拟 FM 信号的方向扩展混合边带的带宽以增加数字容量，这个附加的频谱，配置在各个第一主边带的内沿，被称作第一扩展（PX）边带。

2.2.3 全数字波形

采用全数字波形实现了最大的系统提高，全数字波形中去除了模拟信号，第一数字边带的带宽被完全扩展，就像在扩展混合波形中一样。另外，这种波形允许在模拟 FM 信号腾出的频谱中发送低功率的数字第二边带。

2.3 系统控制信道

系统控制信道（SCCH）传输控制和状态信息，第一和第二服务模式以及分集时延控制从 L2 被发送到 L1，而同步信息则从 L1 被发送到 L2。

服务模式规定了逻辑信道的所有允许的配置，共有十一种服务模式。

2.4 逻辑信道

逻辑信道是具有特定服务等级的、将传输帧中的 L2 SDU 传送到 L1 的信号路径，服务等级由服务模式决定。数字系统 C 的 L1 为较高层协议提供十个逻辑信道。在每一种服务模式中，不是所有的逻辑信道都会被使用。

2.4.1 主逻辑信道

有四个主逻辑信道与混合波形和全数字波形一起使用，它们被记作 P1、P2、P3 和主要 IBOC 数据业务 (PIDS)，表 14 所示的是随着主要服务模式而变化的各个主要逻辑信道支持的理论信息速率。

表 14
主逻辑信道的理论信息速率

服务模式	理论信息速率 (kbit/s)				波 形
	P1	P2	P3	PIDS	
MP1	25	74	0	1	混合
MP2	25	74	12	1	扩展的混合
MP3	25	74	25	1	扩展的混合
MP4	25	74	50	1	扩展的混合
MP5	25	74	25	1	扩展的混合，全数字
MP6	50	49	0	1	扩展的混合，全数字
MP7	25	98	25	1	扩展的混合，全数字

2.4.2 副逻辑信道

有六个只用于全数字波形的副逻辑信道，它们被记作 S1、S2、S3、S4、S5 和辅助 IBOC 数据业务 (SIDS)，表 15 所示的是随着辅助服务模式而变化的各个副逻辑信道支持的近似理论信息速率。

表 15
副逻辑信道的近似理论信息速率

服务模式	近似信息速率 (kbit/s)						波 形
	S1	S2	S3	S4	S5	SIDS	
MS1	0	0	0	98	6	1	全数字
MS2	25	74	25	0	6	1	全数字
MS3	50	49	0	0	6	1	全数字
MS4	25	98	25	0	6	1	全数字

2.4.3 逻辑信道功能性

逻辑信道 P1 到 P3 用来传输音频和数据，S1 到 S5 可以被配置成传送数据或者环绕声音频，PIDS 和 SIDS 逻辑信道用来传送 IBOC 数据业务 (IDS) 信息。

各个逻辑信道的性能可以通过三个特征化的参数来进行完整地描述：传递、等待时间和鲁棒性，信道编码、频谱映射、交织器深度和分集时延是这些特征化参数的分量，服务模式为各个有效逻辑信道唯一地配置了这些分量，从而给适当的特征化参数赋值。

另外，服务模式规定了经过各个有效逻辑信道的传输帧的组帧和同步。

2.5 功能部件

本小节包含各个 L1 功能单元和相关信号流程的深入描述，图 28 是 L1 处理的功能框图，音频和数据从较高的 OSI 层通过 L1 SAP 传递到物理层、调制解调器。

2.5.1 服务访问点

L1 SAP 定义了系统协议栈的 L2 和 L1 之间的接口，每个逻辑信息和 SCCH 都有他们自己的 SAP，各个信道以离散的、由服务模式决定的独特大小和速率的传输帧进入 L1，这些 L2 传输帧典型地被称作 L2 SDU 和 SCU。

2.5.2 扰码

当波形在传统的模拟 FM 解调器中被解调时，这项功能把各个逻辑信道中的数字数据随机化，以便“白化”和减轻信号的周期性。

2.5.3 信道编码

数字系统 C 采用有效编码率为 2/5 的维特比卷积码，这种卷积编码给各个逻辑信道中的数字数据增加了冗余，以便提高当存在信道损耗时它的可靠性。逻辑信道矢量大小的增加与编码率成反比，编码技术由服务模块配置，分集时延也被施加到所选择的逻辑信道上，在信道编码器的输出端，逻辑信道矢量保留它们的同一性。

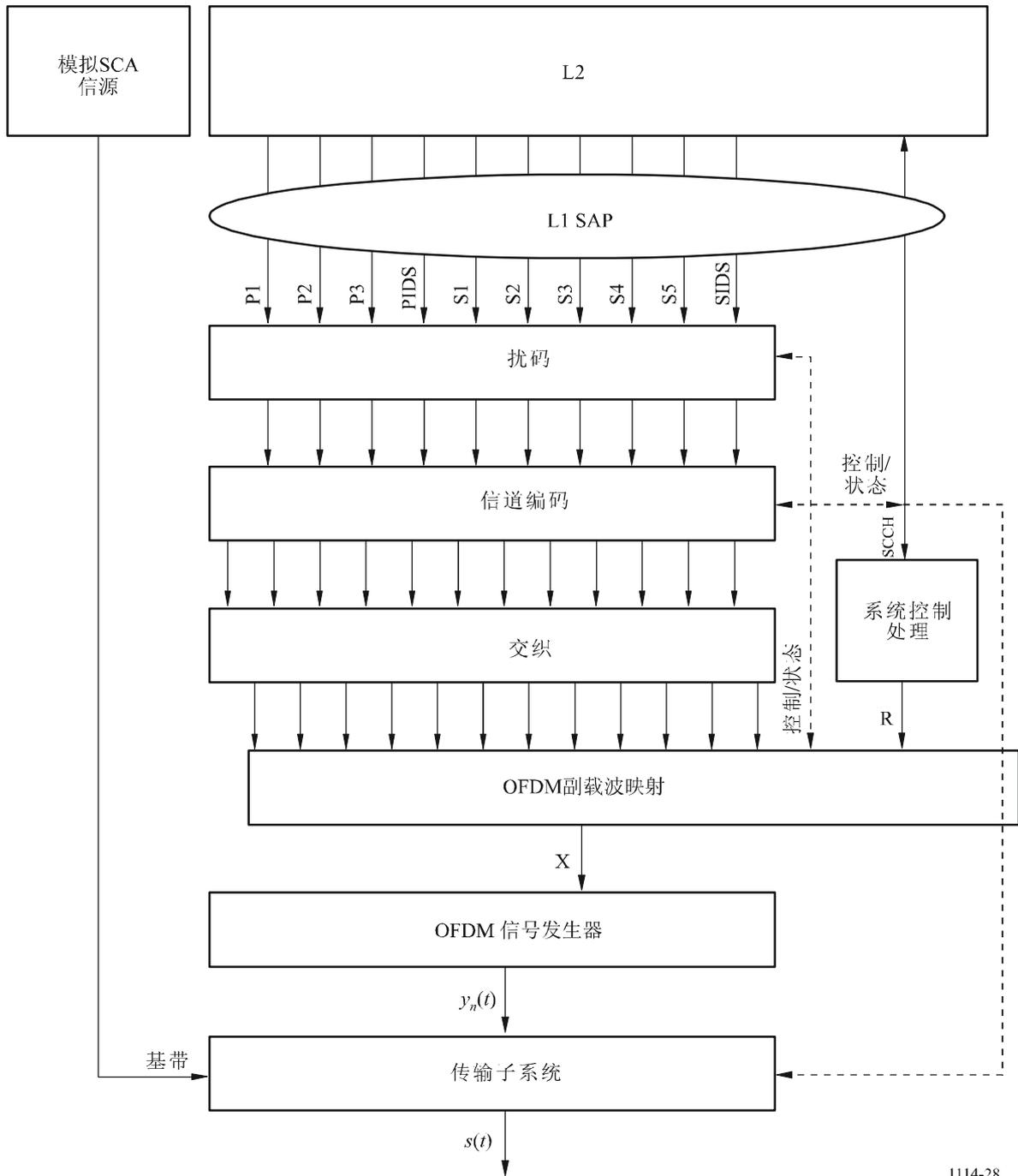
2.5.4 交织

时间和频率的交织用于减小突发错误的影响，交织技术适合 VHF 衰落环境，由服务模式配置。各个逻辑信道是单独交织的，交织器的深度以信道的使用为基础，在主音频信道中（P1 和 P2）交织器的长度相当于一个 L1 帧。在这个过程中，逻辑信道失去了它们的同一性，采用矩阵格式构建交织器的输出；每个矩阵由一个或多个逻辑信道组成，与发送频谱的特定部分相关联，包含交织在内总的分集时延为 3 个 L1 帧（ 3×1.486 s）。

2.5.5 系统控制过程

这项功能产生一个系统控制数据序列矩阵用于基准副载波上的广播，该矩阵包括控制和状态（例如服务模式）。

图 28
FM 空中接口 L1 功能框图



1114-28

2.5.6 OFDM 副载波映射

这项功能把交织的矩阵和系统控制矩阵分配到 OFDM 副载波, 每个有效交织矩阵的一行经过 OFDM 符号 T_s 的处理产生一个输出矢量 \mathbf{X} , 该矢量是信号的频域表示。映射特别适合于不均匀的干扰环境, 并且随着服务模式而变化。

2.5.7 OFDM 信号发生器

这项功能产生时域信号的数字部分，输入矢量被转换为成形的时域基带脉冲 $y_n(t)$ ，定义一个 OFDM 符号。

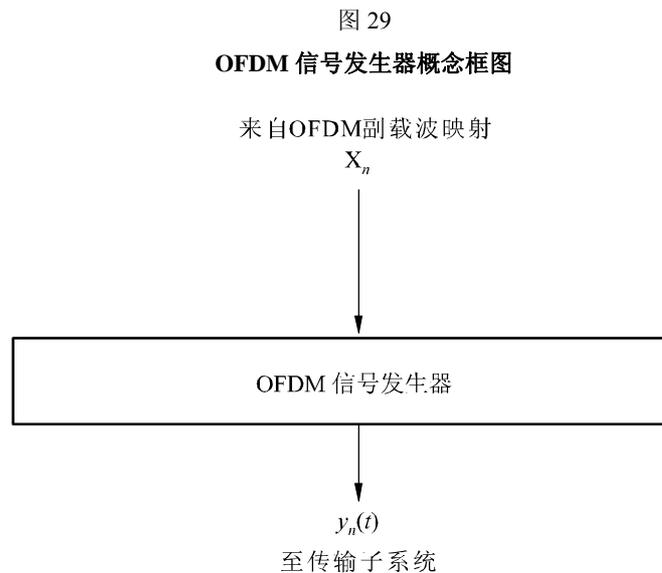
2.5.8 传输子系统

这项功能为经过 VHF 信道传输安排基带波形的格式，主要子功能包括符号级联和频率上变频，另外，当传输混合波形时，这项功能对信源进行调制，并把它和数字信号合并在一起形成一个合成的混合信号 $s(t)$ ，为传输作准备。

3 功能描述

3.1 引言

OFDM 信号发生器接收来自 OFDM 副载波映射的复数的、频域 OFDM 符号，输出代表数字系统 C 信号数字部分的时域脉冲，OFDM 信号发生器的概念框图如图 29 所示。



1114-29

OFDM 信号发生器的输入是长度为 L 的复数矢量 X_n ，代表 OFDM 符号 n 中各个 OFDM 副载波的复数集数值，OFDM 信号发生器的输出是复数的、基带的、时域波形 $y_n(t)$ ，代表数字系统 C 关于 OFDM 符号 n 信号的数字部分。

3.2 传输子系统

3.2.1 引言

传输子系统为经过 VHF 信道传输安排基带 IBOC 波形的格式，功能包括符号级联和频率上变频，另外，当传输混合或者扩展混合波形时，这项功能在把基带模拟信号和数字波形合并在一起之前，对基带模拟信号进行延迟和调制。

这个模块的输入是来自 OFDM 信号发生器功能单元的复数的、基带的、时域 OFDM 波形 $y_n(t)$ ，当传输混合或者扩展混合波形时，基带模拟信号 $m(t)$ 连同可选的 SCA 信号也是来自模拟信源的输入，另外，模拟分集时延 (DD) 控制是来自 L2 经过控制信道的输入，这个模块的输出为 IBOC 波形。

图 30

混合/扩展混合传输子系统功能框图

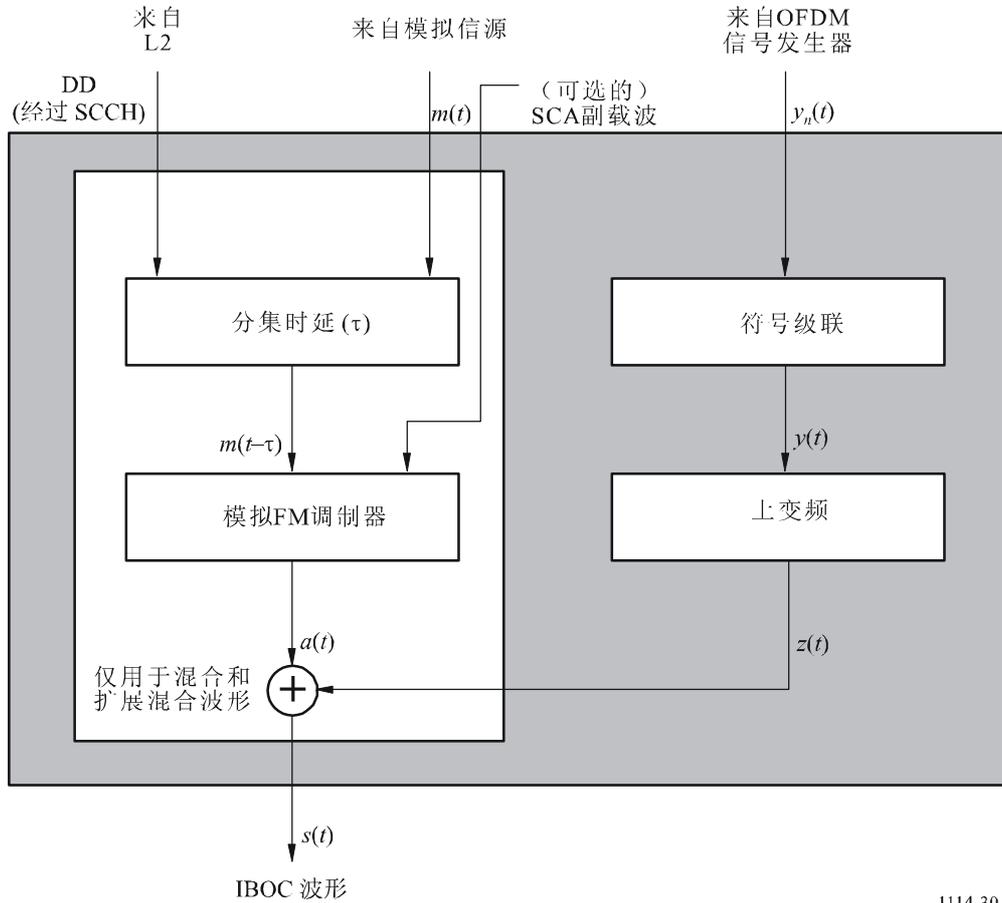
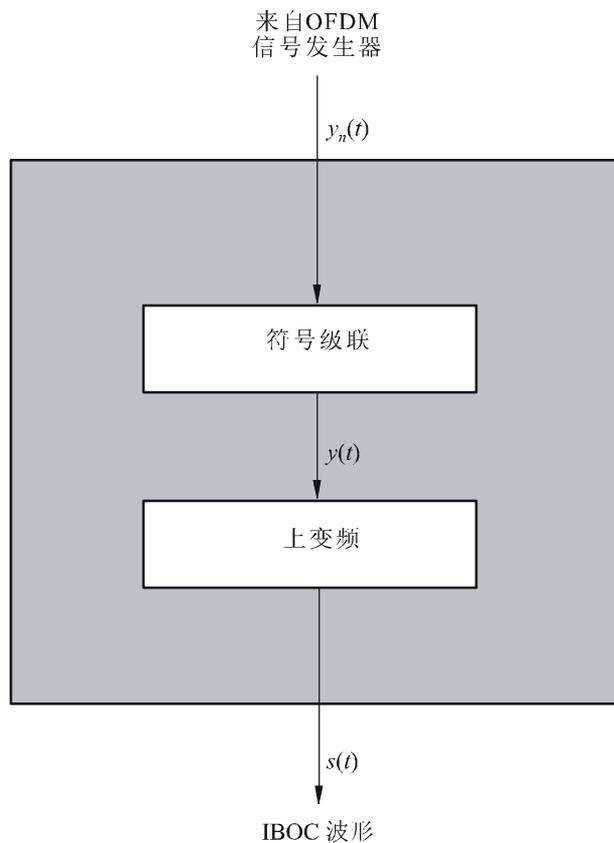


图 31
全数字传输子系统功能框图



1114-31

3.2.2 分集时延

当播送混合和扩展混合波形时， $z(t)$ 与模拟 FM 信号 $a(t)$ 合并在一起。产生 $a(t)$ 的第一步是把 DD 施加到基带模拟信号 $m(t)$ 上，经过 SCCH 接收到的来自 L2 的模拟 DD 控制位被上面的协议层用来启用或禁用 DD，如果 DD 为 0，则 DD 被禁用；如果 DD 为 1，则被启用。当启用 DD 时，把一个可调整的时延 τ 施加到基带模拟信号 $m(t)$ 上，该时延是固定的，这样在模拟/数字合并器的输出端， $a(t)$ 落后于相应数字信号 $z(t)$ 的时间为 T_{dd} ，在数字系统 C 中，模拟和数字信号传送相同的音频节目，在模拟/数字合并器的输出端模拟音频比相应的数字音频延迟 T_{dd} 。这个时延是可以调整的以便补偿在模拟和数字链中的处理时延。

3.2.3 模拟 FM 调制器

对于混合和扩展混合波形，适当延迟的基带模拟信号 $m(t-\tau)$ 调频产生等同于现有模拟信号的 RF 模拟 FM 波形。

3.2.4 模拟/数字合并器

当播送混合或者扩展混合波形时,模拟调制的 FM RF 信号与数字调制的 IBOC RF 信号合并在一起产生数字系统 C 信号 $s(t)$ 。波形的模拟和数字部分都以相同的载波频率为中心,输出频谱中各个数字边带的电平由 OFDM 副载波映射进行适当地调整。

3.3 同频中继器的使用

数字系统 C 中 OFDM 调制的使用使得可以用同频数字中继器或者单频网络填充想要覆盖但由于地形和/或遮蔽信号损耗比较严重的区域,典型的应用将是在站点的服务区内山脉或者其他地形的遮挡限制了模拟或数字的性能。

数字系统 C 工作在 OFDM 符号之间的有效保护时间大约为 $150 \mu\text{s}^2$,为了避免严重的符号间干扰,在主要传输系统方向的有效覆盖应限制在 22 km 以内,特别地,在主天线方向距离中继器超过 22 km 的地方,来自主发射机的信号与中继信号的比应至少为 10 dB,通过使用方向性天线保护主站,能够提高同频转播台之间的性能和距离。

3.4 全球定位系统 (GPS) 同步

为了确保精确的时间同步,实现快速的站点捕获和转播台同步,各个站点是 GPS 锁定的,这通常是通过与一个信号同步来实现的,而这个信号在时间和频率上与 GPS³是同步的,不锁定于 GPS 的传输由于不能与其它站点同步,将不能在 SFN 的情况下提供接收机端的快速调谐⁴。

4 数字边带电平

对于混合、扩展混合和全数字波形,各个数字边带内每个 OFDM 副载波的幅度标定见表 16,相对于未调制模拟 FM 载波的总功率(假设等于 1)规定混合波形的数值,相对于已经在混合和扩展的混合模式中传输的未调制模拟 FM 载波的总功率(假设等于 1)规定数字波形的数值。

² $150 \mu\text{s}$ 折合 45 km 的传播距离。

³ GPS 锁定站被称作第 I 级: GPS 锁定传输设备。

⁴ 第 II 级: 非 GPS 锁定传输设备。

表 16

OFDM 副载波标定

波 形	模 式	边 带	幅度比例 因子符号	幅度比例因子 ⁽¹⁾ (相对于总 的模拟 FM 功率)	幅度比例因子 ⁽²⁾ (相对于 总的模拟 FM 功率) (dB)
混合	MP1	主要的	a_0	5.123×10^{-3}	-41.39
扩展的混合	MP2-MP7	主要的	a_0	5.123×10^{-3}	-41.39
全数字	MP5-MP7	主要的	a_2	1.67×10^{-2}	-31.39
	MS1-MS4	副的	a_4	5.123×10^{-3}	-41.39
		副的	a_5	3.627×10^{-3}	-44.39
		副的	a_6	2.567×10^{-3}	-47.39
		副的	a_7	1.181×10^{-3}	-50.39

⁽¹⁾ 每个 IBOC 副载波区域的幅度比例因子。

⁽²⁾ 在 1 kHz 带宽测得的以 dB 计的幅度比例因子。

对于混合和扩展的混合波形，要选择数值使得在主数字边带（上部的或下部的）内的总的平均功率低于未调制模拟 FM 载波的总功率 23 dB。

对于全数字波形，要选择数值使得在主数字边带（上部的或下部的）内的总的平均功率高于混合主数字边带内的总功率至少 10 dB。另外，要选择数值使得在副数字边带（上部的或下部的）内的总的平均功率至少低于全数字主数字边带内的总功率 20 dB。

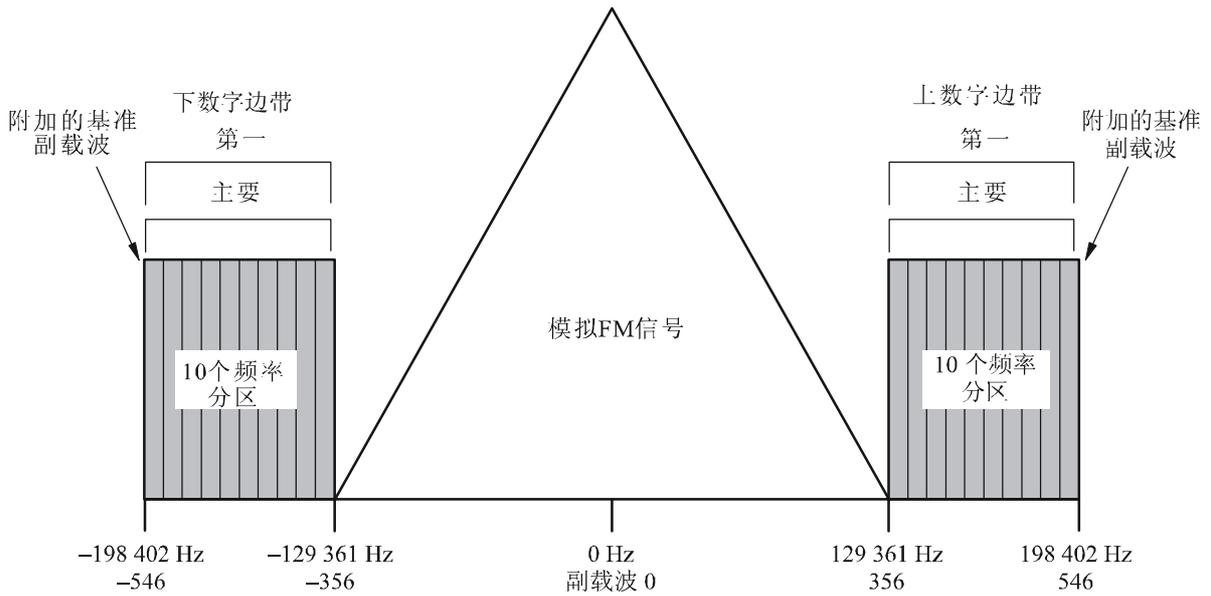
5 混合模式的频谱

在位于模拟 FM 信号两边的第一主边带中发送数字信号，每个第一主边带由十个频率分区组成，这些频率分区被分配在副载波 356 到 545，或者副载波-356 到-545 之间（见图 32 和表 17）。副载波 546 和-546 也包含在 PM 边带中，作为附加的基准副载波。PM 边带内副载波的幅度统一采用幅度比例因子进行调整。

图 32

混合波形的频谱—服务模式 MP1

(数字副载波的电平要使得这些载波的总功率低于 FM 模拟载波标称功率 20 dB)



1114-32

表 17

混合波形频谱一览表 — 服务模式 MP1

边带	频率分区的数量	频率分区分类	副载波范围	副载波频率 (距信道中心) (Hz)	幅度比例因子	频率范围 (Hz)	备注
上部分 PM	10	A	356 到 546	129 361 到 198 402	a_0	69 041	包括附加的基准副载波 546
下部分 PM	10	B	-356 到 -546	-129 361 到 -198 402	a_0	69 041	包括附加的基准副载波 -546

6 扩展的混合模式的频谱

通过给存在于混合波形的 PM 边带增加第一扩展边带来创建扩展的混合波形。根据服务模式，可以将一个、两个或者四个频率分区增加到各个 PM 边带的内沿，每个 PM 边带包括十个频率分区和一个附加的基准副载波，跨越副载波 356 到 546 或者副载波-356 到-546。上部分第一扩展边带包含副载波 337 到 355（一个频率分区），318 到 355（两个频率分区）或者 280 到 355（四个频率分区）。下部分第一扩展边带包含副载波-337 到-355（一个频率分区），-318 到-355（两个频率分区）或者-280 到-355（四个频率分区）。在第一扩展边带内的副载波统一采用与 PM 边带相同的幅度比例因子 a_0 进行幅度调整（见图 33 和表 18）。

图 33

扩展的混合波形频谱 — 服务模式 MP2 到 MP4

（数字副载波的电平要使得这些载波的总功率低于 FM 模拟载波标称功率 20 dB）

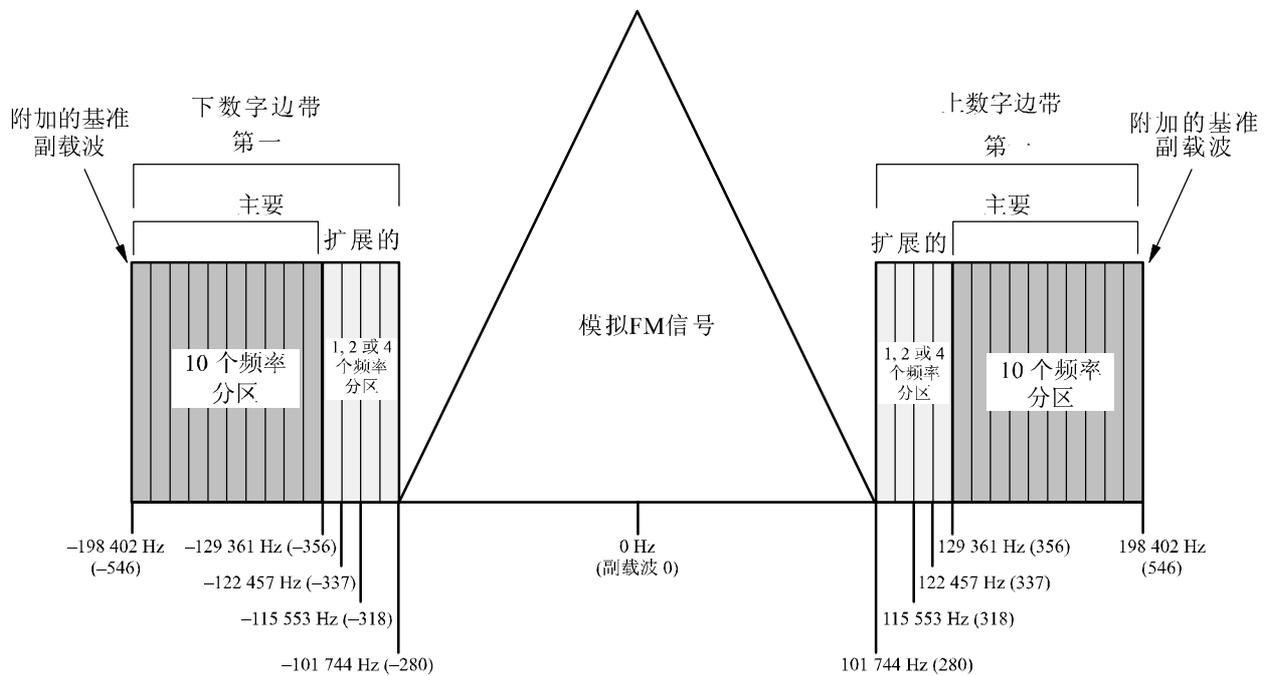


表 18
扩展的混合波形频谱一览表 — 服务模式 MP2 到 MP4

边 带	频率分区的数量	频率分区分类	副载波范围	副载波频率(距 离信道中心) (Hz)	幅度比例 因子	频率范围 (Hz)	备 注
上部分 PM	10	A	356 到 546	129 361 到 198 402	a_0	69 041	包括附加的基准副载波 546
下部分 PM	10	B	-356 到 -546	-129 361 到 -198 402	a_0	69 041	包括附加的基准副载波-546
上部分第一 扩展 (1 个频率 分区)	1	A	337 到 355	122 457 到 128 997	a_0	6 540	无
下部分第一 扩展 (1 个频率 分区)	1	B	-337 到 -355	-122 457 到 -128 997	a_0	6 540	无
上部分第一 扩展 (2 个频率 分区)	2	A	318 到 355	115 553 到 128 997	a_0	13 444	无
下部分第一 扩展 (2 个频率 分区)	2	B	-318 到 -355	-115 553 到 -128 997	a_0	13 444	无
上部分第一 扩展 (4 个频率 分区)	4	A	280 到 355	101 744 到 128 997	a_0	27 253	无
下部分第一 扩展 (4 个频率 分区)	4	B	-280 到 -355	-101 744 到 -128 997	a_0	27 253	无

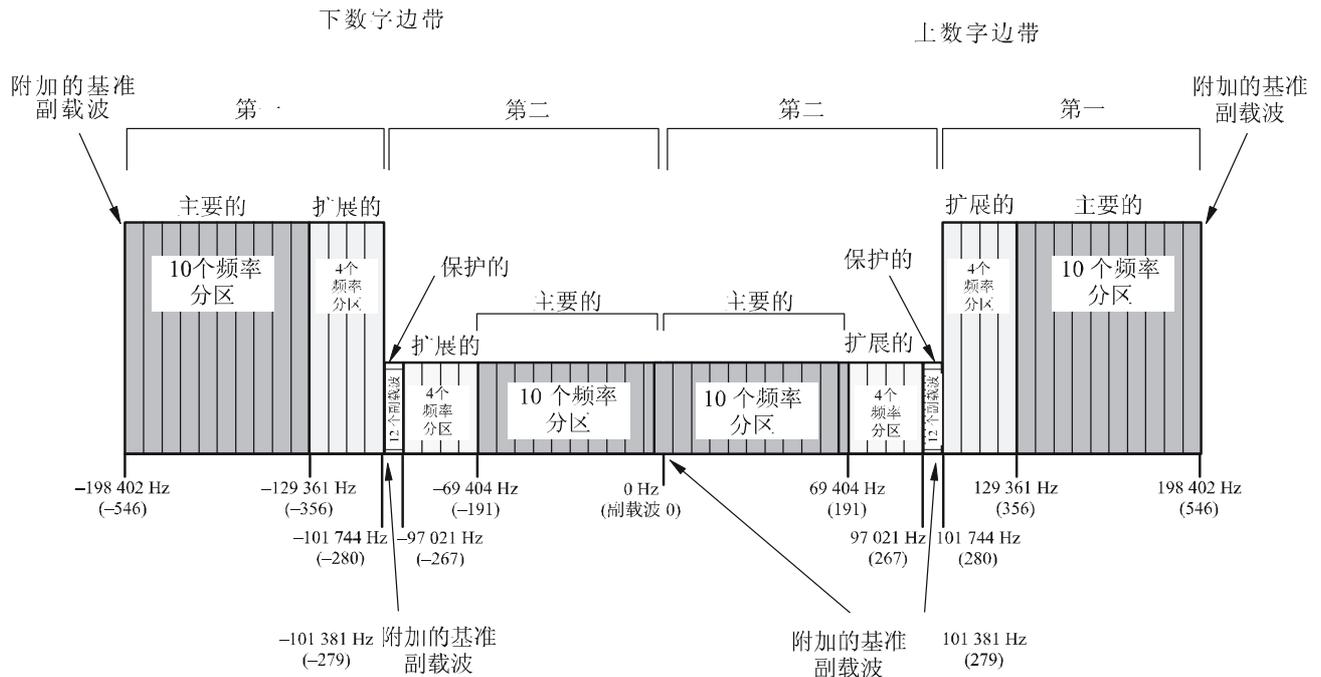
7 全数字模式的频谱

去掉模拟信号、完全扩展第一数字边带的带宽，并在模拟信号腾出的频谱中增加低功率的第二边带，从而构建全数字波形。全数字波形的频谱如图 34 所示。

图 34

全数字波形的频谱 — 服务模式 MP5 到 MP7, MS1 到 MS4

(数字副载波的电平要使得这些载波的总功率低于它所替代的 FM 模拟载波的标称功率不超过 10 dB)



1114-34

除了十个主要频率分区以外，四个扩展的频率分区全部都在全数字波形的各个第一边带中，每个第二边带也有十个第二主要（SM）和四个第二扩展频率分区，然而与第一边带不同，SM 频率分区被映射到更接近于信道的中心，而扩展的频率分区距离中心要远一些。

每一个第二边带还支持由 12 个 OFDM 副载波和 279 到 -279 的基准副载波组成的一个小的第二保护（SP）区，边带被称作“保护的”是因为他们位于频谱中最不大可能受到模拟或数字干扰影响的区域，把一个附加的基准副载波设置在信道的中心（0），由于 SP 区不包含频率分区，因此 SP 区的频率分区分类不再适用。

每个 SM 边带跨越副载波 1 到 190 或者 -1 到 -190，上部分第二扩展边带包括副载波 191 到 266，上部分 SP 边带包括副载波 267 到 278，加上附加的基准副载波 279。下部分第二扩展边带包括副载波 -191 到 -266，下部分 SP 边带包括副载波 -267 到 -278。整个全数字频谱的总的频率跨度为 396 803Hz。在 PM 和第一扩展边带内的副载波采用幅度比例因子 a_2 进行调整，在 SM、第二扩展的和 SP 边带内的副载波统一采用具有四个不连续等级 a_4 - a_7 的幅度比例因子进行调整。

表 19

全数字波形频谱一览表 — 服务模式 MP5 到 MP7, MS1 到 MS4

边 带	频率分区的数量	频率分区分类	副载波范围	副载波频率(距离信道中心) (Hz)	幅度比例因子	频率范围 (Hz)	备 注
上部分 PM	10	A	356 到 546	129 361 到 198 402	a_2	69 041	包括附加的基准副载波 546
下部分 PM	10	B	-356 到 -546	-129 361 到 -198 402	a_2	69 041	包括附加的基准副载波-546
上部分第一扩展	4	A	280 到 355	101 744 到 128 997	a_2	27 253	无
下部分第一扩展	4	B	-280 到 -355	-101 744 到 -128 997	a_2	27 253	无
上部分 SM	10	B	0 到 190	0 到 69 041	a_2	69 041	包括附加的基准副载波 0
下部分 SM	10	A	-1 到 -190	-363 到 -69 041	a_2	68 678	无
上部分第二扩展	4	B	191 到 266	69 404 到 96 657	a_4-a_7	27 253	无
下部分第二扩展	4	A	-191 到 -266	-69 404 到 -96 657	a_4-a_7	27 253	无
上部分 SP	不适用	不适用	267 到 279	97 021 到 101 381	a_4-a_7	4 360	包括附加的基准副载波 279
下部分 SP	不适用	不适用	-267 到 -279	-97 021 到 -101 381	a_4-a_7	4 360	包括附加的基准副载波-279

8 发射限制

8.1 对 IBOC 运行的发射限制

混合的和全数字的载波电平在低于 FM 发射屏蔽时工作良好，表 20 对来自美国联邦法规汇编（CFR）标题 47 § 73.317 的一个管理部门屏蔽的例子作了概括。

表 20
美国对 FM 信道的发射限制，其随着距离载波频率的偏移量而变化

载波频率偏移量 (kHz)	相对于未经调制的 FM 载波的功率谱密度 (dBc/kHz) ⁽¹⁾
120 到 240	-25
240 到 600	-35
大于 600	-80 或 $-43 - 10 \log_{10} x$ ，无论哪一个更小，这里 x 为功率 (W)，指的是未调制发射机总的输出载波功率

⁽¹⁾ 测量是在 10 s 时间段内对 1 kHz 带宽上的功率谱密度取平均值。

图 35 和图 36 描绘了在 1 kHz 带宽上测得的、以 dB 计的所有来源的噪声电平相对于数字边带标称功率谱密度，这个噪声测量包含所有的来源，包括：

- IBOC 激励器的相位噪声以及
- 来自发射机的互调产物。在表 20、21、22 和 23 中，电平已经被调整到描述低于 0 dBc 发射屏蔽的电平。

表 21
IBOC 数字载波功率⁽¹⁾

混合模式	全数字模式	
	主要节目载波	次要的辅助业务载波
-41.39	-31.39	-50.39

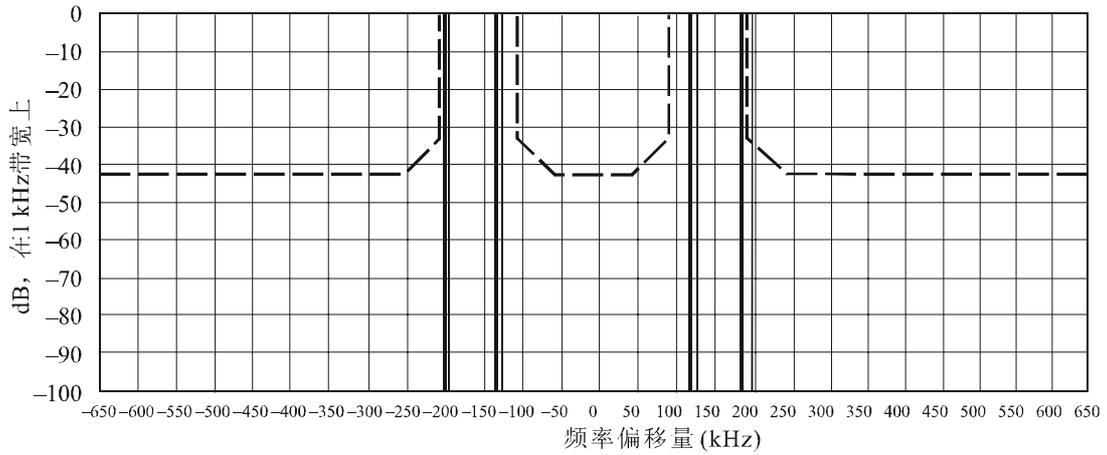
⁽¹⁾ 1 kHz 带宽上的标称功率谱密度相对于参考 0 dBc 屏蔽。

8.1.1 对混合模式运行的发射限制

各种来源的噪声，除了频率距离载波在 100 到 200 kHz 之间的噪声以外，包括 IBOC 激励器的相位噪声和互调产物，都应该遵守图 35 和表 22 的限制，要求归纳如下，这里 dB 是相对于在 1 kHz 带宽的数字边带上的标称功率谱密度。

图 35

IBOC 混合模式发射限制*



— — — 没有模拟载波存在时测得的混合高功放（HPA）噪声性能

———— 标称的混合载波功率谱密度

* 0 dB 是相对于在1 kHz带宽的数字边带上的标称功率谱密度

1114-35

表 22

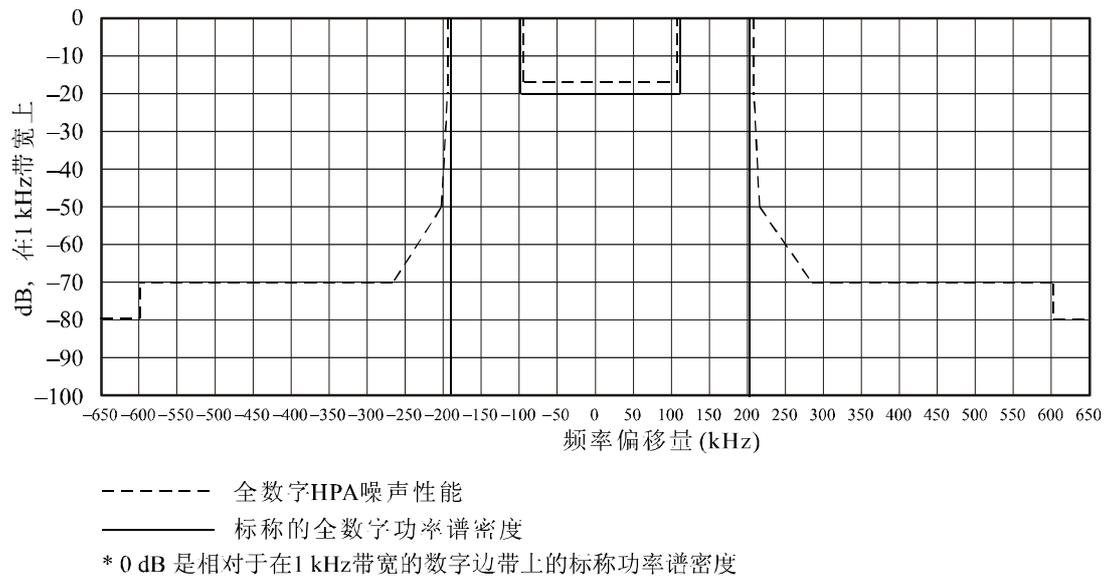
混合模式发射限制

频率, F, 相对于载波的偏移量 (kHz)	电平 (dB/kHz)
0-50	-83.39 dB
50-95	$\{-83.39 + (\text{频率 (kHz)} - 50 \text{ kHz}) \cdot 0.2\}$ dB
95-100	$\{-61.39 + (\text{频率 (kHz)} - 100 \text{ kHz}) \cdot 2.6\}$ dB
200-205	$\{-61.39 - (\text{频率(kHz)} - 200 \text{ kHz}) \cdot 2.6\}$ dB
205-250	$\{-74.39 - (\text{频率(kHz)} - 205 \text{ kHz}) \cdot 0.2\}$ dB
>250	-83.39 dB

8.1.2 对全数字模式运行的发射限制

各种来源的噪声，尽管频率距离载波超过 200 kHz，包括 IBOC 激励器的相位噪声和互调产物，都应遵守图 36 和表 23 的限制。

图 36
全数字发射限制



1114-36

要求归纳如下，这里 dB 是相对于在 1 kHz 带宽的数字边带上的标称功率谱密度。

表 23
全数字发射限制

频率, F , 相对于载波的偏移量 (kHz)	电平 (dB/kHz)
200-207.5	$\{-51.39 - (\text{频率(kHz)} - 200 \text{ kHz}) \cdot 1.733\}$ dB
207.5-250	$\{-64.39 - (\text{频率(kHz)} - 207.5 \text{ kHz}) \cdot 0.2118\}$ dB
250-300	$\{-73.39 - (\text{频率(kHz)} - 250 \text{ kHz}) \cdot 0.56\}$ dB
300-600	-101.39 dB
>600	-111.39 dB

9 实验室测试结果摘要

数字系统 C 的实验室测试归纳如下，所采用的衰落分布标记为城市快速 (UF)、城市慢速 (US)、乡村快速 (RF) 或者地形遮挡 (TO) 快速，分别应用于有用信号及其干扰，干扰电平以 dB_{des} 为单位来表示， dB_{des} 解释为 dB 相对于有用混合信号的总功率。对于每次块差错率测试，表 24 列出了开展测试的干扰情况、 C_d/N_0 (dB/Hz)、衰落分布、干扰电平和测得的块差错率。

表 24

FM 混合 IBOC DSB 性能测试结果

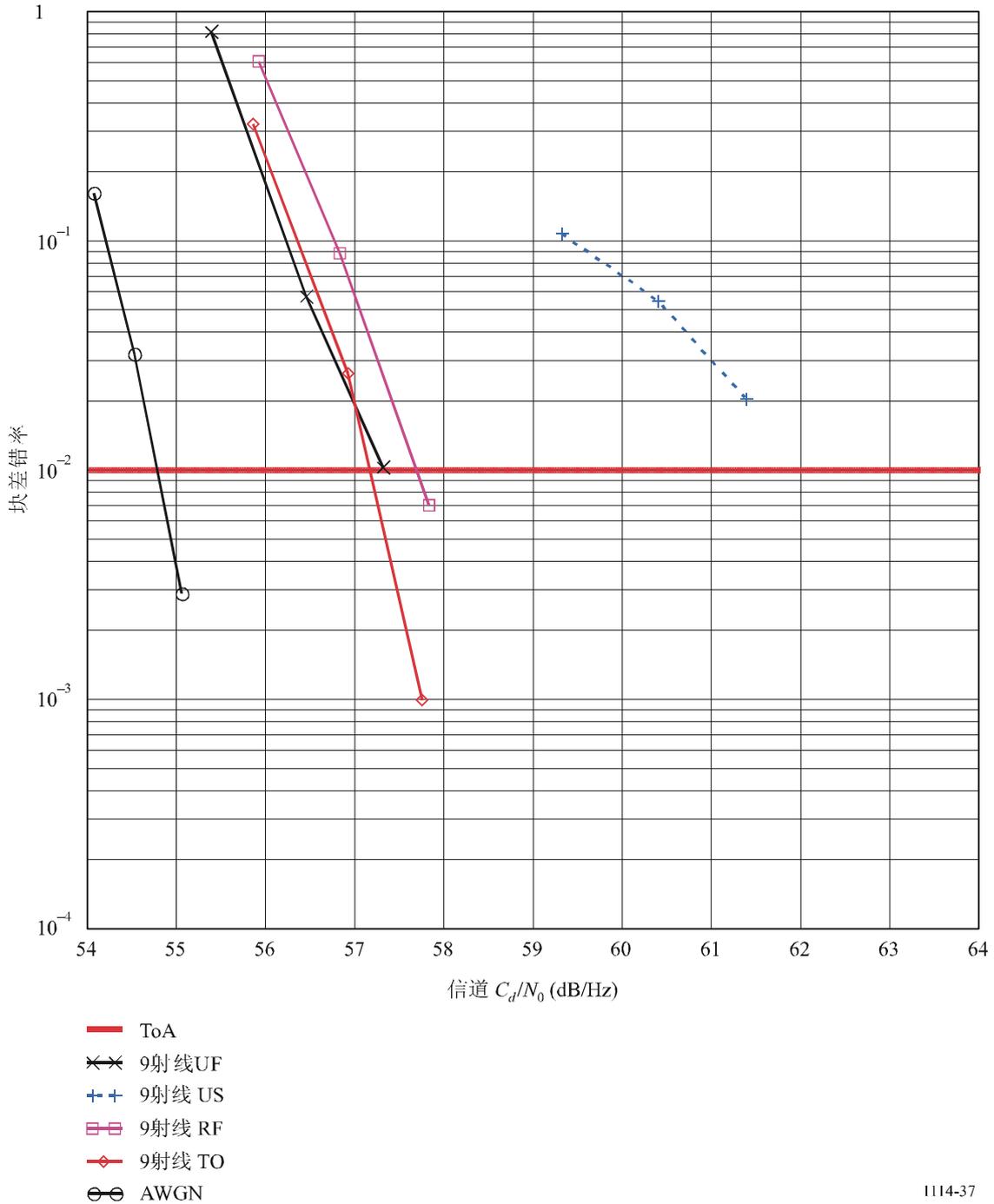
测 试	输入参数					测 量		
						数字性能	在数字 ToA 的 模拟主观评价	
	C_d/N_0 (dB/Hz)	衰落	同信道 (dB _{des})	第一相邻 (dB _{des})	第二相邻 (dB _{des})	块差错率	文件	主观音频 衰减
高斯噪声没有衰落/没有 干扰	54.1					0.16	audio1.wav	可听见
	54.5					0.032		
	55.1					0.0029		
9 射线衰落	55.4	UF				0.8	audio2.wav	可听见
	56.4					0.056		
	57.3					0.012		
	59.3	US				0.106	audio3.wav	可听见
	60.4					0.054		
	61.4					0.0202		
	55.9	RF				0.6	audio4.wav	可听见
	56.8					0.087		
	57.8					0.007		
	55.9	TO				0.317	audio5.wav	可听见
	56.9					0.026		
	57.8					0.001		
第一邻道干扰	61.5	UF				0.075	audio6.wav	可听见
	62.4				-6.0	0.045		
	63.4					0.00842		
	59.4	UF				0.077	audio7.wav	可听见
	60.3				-18.0	0.012		
	61.3					0.006		
	58.2	UF				0.0735	audio8.wav	可听见
	59.2				-24.0	0.0109		
	60.1					0.005		
	57.2	UF				0.0287	audio9.wav	可听见
58.2				-30.0	0.0082			
第二邻道干扰	57.9	UF				0.1	audio10.wav	可听见
	58.9				20.0	0.018		
	60.5					0.00085		
同信道干扰	60.2	UF	-10.0			0.013	audio11.wav	超出了失败 临界点
	61.3					0.0097		
	65.3					0.00014		
	58.4	UF	-20.0			0.013	audio12.wav	可听见
	59.3					0.0011		
	60.4					0.00035		

9.1 在高斯噪声中的性能

这项测试测量系统性能的上限，并记录当存在高斯噪声、没有瑞利衰落和干扰时在数字听觉门限 (ToA) 的模拟音频，性能用图 37 中的块差错率来表示，归纳在表 24 中。表 24 指出正是在数字 ToA 之前，能够听得出模拟音频质量的下降。

图 37

混合系统在不同类型的 9 射线衰落和加性高斯白噪声 (AWGN) 情况下的块错误率结果

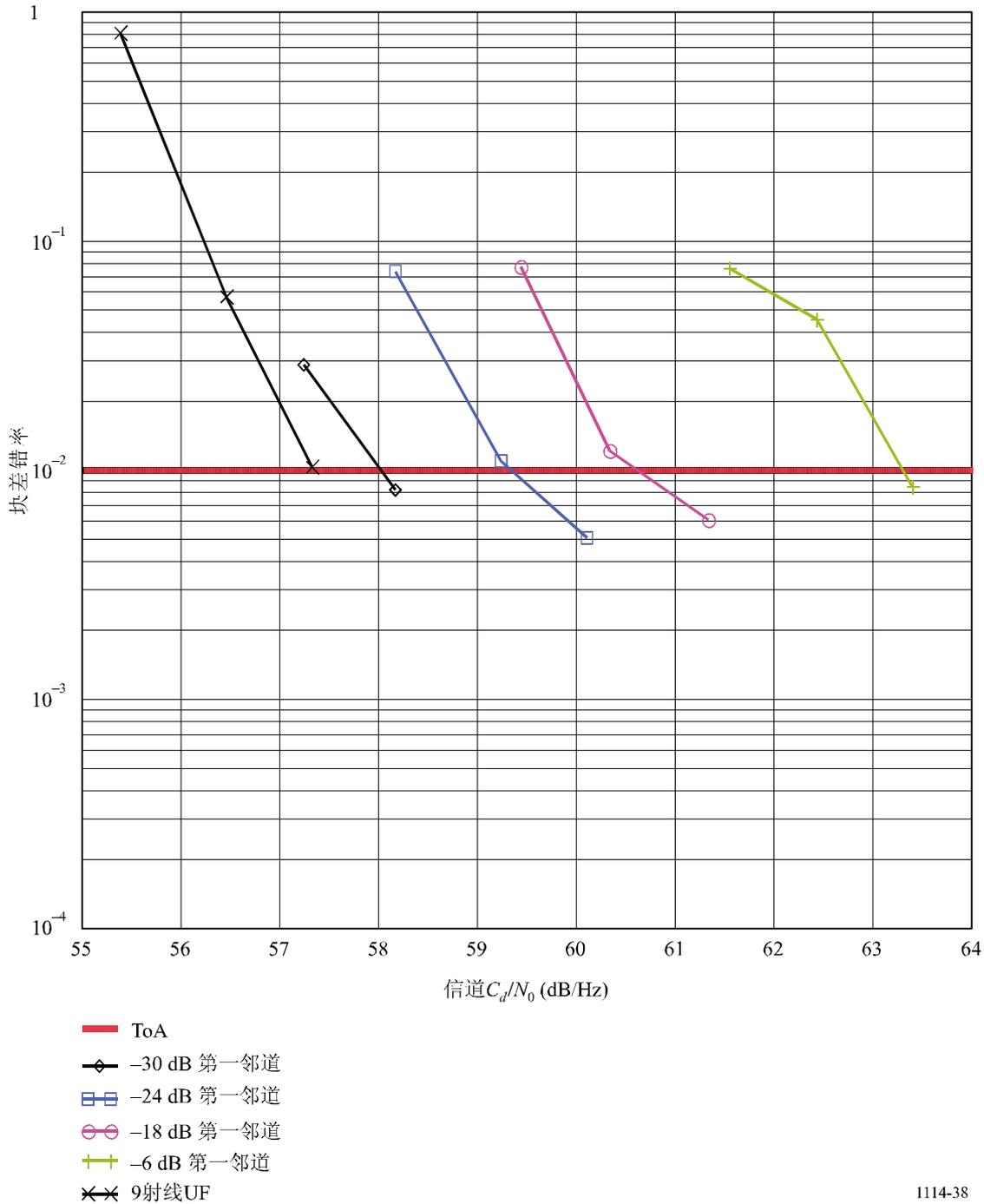


9.2 在瑞利衰落中的性能

这项测试测量系统性能，并记录存在高斯噪声和各种类型瑞利衰落时在数字 ToA 处的模拟音频，性能用图 38 中的块差错率曲线来表示，归纳在表 24 中。结果显示对于衰落分布不敏感，除非在城市慢衰落的情况下，这种情况会产生很长时间的信号衰落。城市慢衰落分布在现有的模拟传输中会产生特别烦人的中断。

图 38

混合系统在 9 射线 UF 衰落和独立衰落的第一邻道干扰情况下的块差错率结果



9.2.1 城市快衰落 (UF)

表 24 给出了主观的模拟音频评价, 这个音频评价指出正是在数字 ToA 之前, 能够听得出模拟音频质量的下降。

9.2.2 城市慢衰落 (US)

表 24 给出了主观的模拟音频评价, 这个音频评价指出正是在数字 ToA 之前, 能够听得出模拟音频质量的下降。

9.2.3 乡村快衰落 (RF)

表 24 给出了主观的模拟音频评价, 这个音频评价指出正是在数字 ToA 之前, 能够听得出模拟音频质量的下降。

9.2.4 地形遮挡快衰落 (TO)

表 24 给出了主观的模拟音频评价, 这个音频评价指出正是在数字 ToA 之前, 能够听得出模拟音频质量的下降。

9.3 存在独立衰落的干扰时的性能

这项测试测量系统的性能, 并记录当存在独立衰落的第一邻道、第二邻道和同信道混合 IBOC 干扰时, 在高斯噪声和瑞利衰落中的模拟音频, 各个干扰和有用信号一样, 都要经历相同类型的瑞利衰落信道; 然而, 所有信号都是独立衰落的, 因而是无关的。

9.3.1 单个的第一邻道干扰

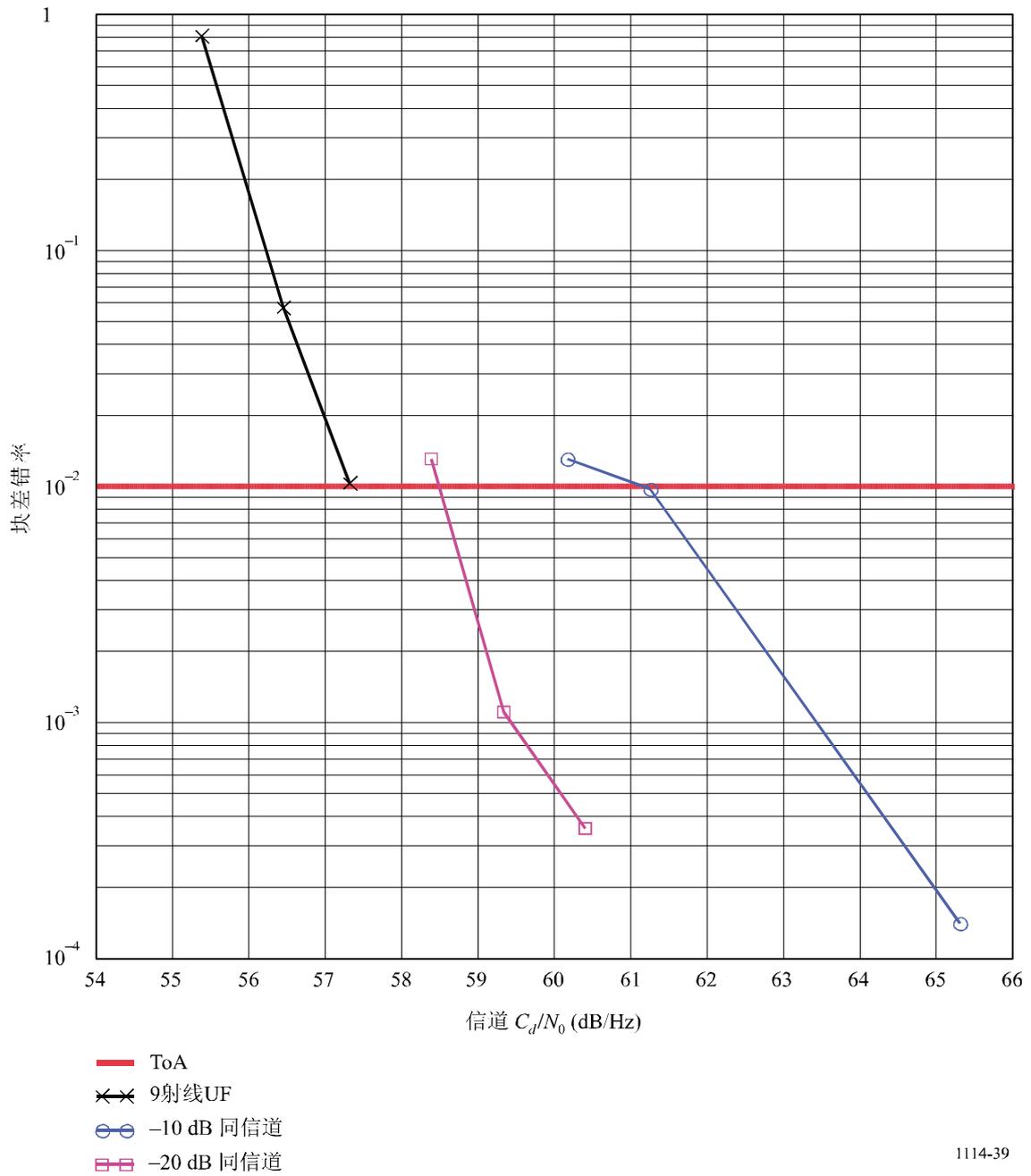
在美国, 完全隔离的 B 级站点被保护到 54 dBu 等值线, 防止第一邻道干扰在 50% 的地方超过 48 dBu 的时间达到 10%。因此, 采用功率变化的第一邻道混合干扰进行测试, 直到干扰电平比有用信号的电平低 6 dB, 块差错率结果如图 38 所示, 归纳在表 24 中。正如所料, 性能会随着干扰电平从 $-30 \text{ dB}_{\text{des}}$ 增加到 $-6 \text{ dB}_{\text{des}}$ 而劣化, 然而, 接收机采用的第一邻道抵消算法确保了较高的系统性能, 即使在城市快衰落环境中存在高电平的第一邻道干扰。表 24 给出了主观模拟音频评价, 这个音频评价表明正是在数字 ToA 之前, 对于各种电平的第一邻道干扰, 都能够听得出模拟音频质量的下降。

9.3.2 单个的同信道干扰

在美国, 完全隔离的 B 级站点被保护到 54 dBu 等值线, 防止同信道干扰在 50% 的地方超过 34 dBu 的时间达到 10%, 这意味着在 54 dBu 恒值线 90% 的时间内 D/U 超过 20 dB。根据这一信息, 能够进行大量的关于同信道干扰特征的观测, 混合的同信道干扰对有用数字信号性能的影响最小, 因为在 54 dBu 模拟保护恒值线它的功率通常会比数字边带低至少 20 dB。这已经通过实验室测试得到了验证, 把 $-20 \text{ dB}_{\text{des}}$ 的混合同信道干扰施加到城市快衰落环境中的有用混合信号上, 块差错率如图 38 所示, 归纳在表 24 中。图 39 表明增加 $-20 \text{ dB}_{\text{des}}$ 的混合同信道干扰会使性能劣化约 1 dB。图 38 也显示出即使同信道干扰的电平增加到 $-10 \text{ dB}_{\text{des}}$, 递增的劣化将会被限制低于 3 dB, 表 24 给出了主观模拟音频评价, 这个音频评价表明正是在数字 ToA 之前, 对于 $-20 \text{ dB}_{\text{des}}$ 的同信道干扰, 能够听得出模拟音频质量的下降。对于 $-10 \text{ dB}_{\text{des}}$ 的同信道干扰, 甚至在数字音频达到它的 ToA 之前, 模拟音频质量的下降就超出了失败临界点。

图 39

带有独立衰落的 10 个信道干扰的混合系统的块差错率

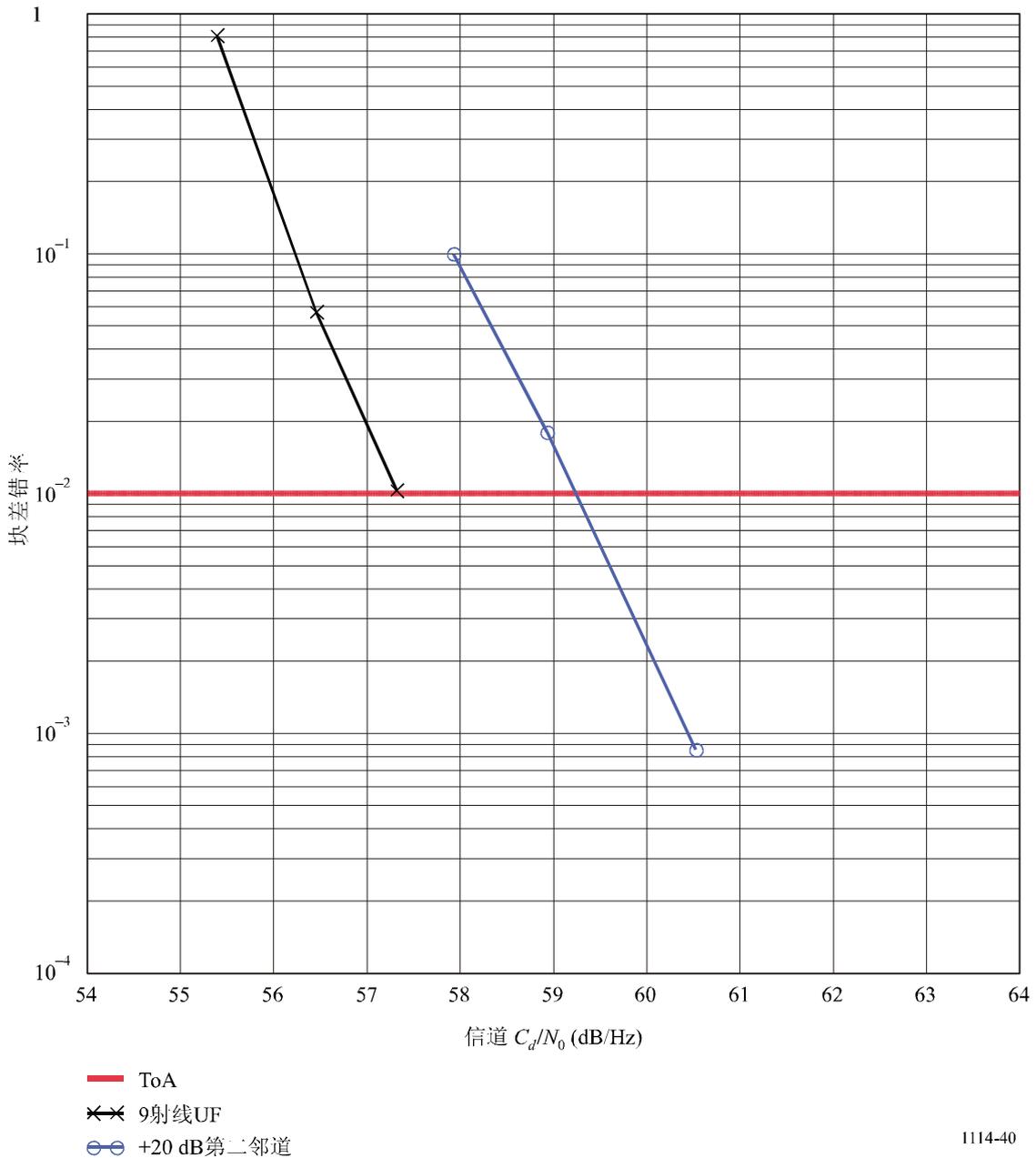


9.3.3 单个的第二邻道干扰

由于干扰旁瓣可能落入有用信号的边带，混合 IBOC 第二邻道干扰可能会对数字性能产生轻微的影响。在实验室测试中已经对这个影响进行了量化，单个的+20 dB 混合第二邻道干扰被施加到城市快衰落环境中的有效混合信号上，块差错率的结果如图 40 所示，归纳在表 24 中。图 40 表明增加+20 dB 的混合第二邻道干扰会劣化性能约 2 dB，表 24 给出了主观的模拟音频评价，这个音频评价表明正是在数字 ToA 之前，能够听得出模拟音频质量的下降。

图 40

带有独立衰落的第二邻道干扰的混合系统的块差错率



9.4 结论

记录表明，在所有的测试环境中，在数字信号质量开始下降的临界点，相应的模拟音频本身呈现出可以听得出来的劣化，这意味着在数字音频劣化尚未被觉察的信号电平，模拟音频就已被劣化，因此，直到数字 ToA 时，数字信号的性能要优于现有模拟信号的性能，当数字信号最终开始呈现出质量下降时，IBOC 接收机将自动地转换到它的模拟信号，因此，数字系统 C 的性能要优于现有模拟 FM 业务的性能。
