

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240280.

光通信系统与网络技术

刘军,朱彦源,孙雨潇,等. 电网帧结构业务数据指针信号同步传输方案[J]. 光通信研究, 2026(4):157-163.

Liu J, Zhu Y Y, Sun Y X, et al. Power Grid Frame Structure Business Data Pointer Signal Synchronization Transmission Scheme[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):157-163.

电网帧结构业务数据指针信号同步传输方案

刘 军¹,朱彦源¹,孙雨潇¹,李伯中¹,徐 健²,喻杰奎²,谭 曼²,黄丽艳²

(1. 国家电网有限公司信息通信分公司,北京 100032; 2. 武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430205)

摘要:【目的】针对新一代电网传输负载增大、业务数据时延敏感性提升,导致电力通信网络传输速度要求提高的问题。文章通过频移键控(FSK)的调制方式,提出了一种低时延的同步数字体系(SDH)帧传输方案。【方法】在电网发送端将传输的指针信号由幅度调制变为频率调制,再由 Delta-Sigma 调制(DSM)变为小幅度的数字信号,将该信号和业务数据数字信号叠加进行同步传输。在接收端直接接收业务数据信号的同时,利用正交检测恢复微弱指针信号。【结果】在基于 FSK 调制的叠加方案下,指针信号在接收端检测误码率(BER)低于前向纠错(FEC)技术门限时,所需的数字信号和业务信号最小幅度比为 0.06,此时满足误码门限的信噪比约为 9 dB,对业务信号造成的功率代价仅为 0.1 dB,使得接收端同样可以准确识别业务信号。【结论】文章提出了一种基于 FSK 调制的指针信号同步传输方案,通过将传输信号的指针信号变为频率调制信号后由 DSM 转变为数字信号与业务数据数字信号同步传输,降低了电网调控信号的反馈时延,提升了电力网络的调控效率。

关键词: 电力通信网络;指针信号;频移键控;Delta-Sigma 调制;正交检测

中图分类号: TN929

文献标志码: A

Power Grid Frame Structure Business Data Pointer Signal Synchronization Transmission Scheme

LIU Jun¹, ZHU Yanyuan¹, SUN Yuxiao¹, LI Bozhong¹, XU Jian², YU Jiekui², TAN Man², HUANG Liyan²

(1. State Grid Information & Telecommunication Co. Ltd., Beijing 100032, China;

2. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: 【Objective】This paper deals with the challenge of rising transmission loads and latency sensitivity in the new power grid, necessitating faster communication network speeds. 【Methods】A low-latency Synchronous Digital Hierarchy(SDH) frame transmission scheme is proposed by Frequency Shift Keying(FSK) modulation. At the transmitter of the grid, the pointer signal is converted from amplitude modulation to frequency modulation, and then from Delta-Sigma Modulation(DSM) to a small-amplitude digital signal, which is superimposed with the payload digital signal for synchronous transmission. At the receiver side, the weak pointer signal is obtained using oversampling quadrature detection while directly receiving the payload signal. 【Results】Under the superposition scheme based on FSK modulation, the pointer signal is detected at the receiver when the Bit Error Rate (BER) is lower than the threshold of the Forward Error Correction(FEC) technique. The minimum amplitude ratio of the required digital signal and the service signal is 0.06. At this time, the signal-to-noise ratio to satisfy the BER threshold is about 9 dB, and the power cost to the service signal is only 0.1 dB, which makes the service signal at the receiving end also accurately recognized. 【Conclusion】This paper proposed a pointer signal co-transmission scheme based on FSK modulation. By converting the pointer signal into a frequency modulated signal and then converting it into a digital signal by DSM, it is directly superimposed on the traffic signal for co-transmission. This scheme reduces the feedback latency and improves the control efficiency of the electric power communication network.

Key words: electric power communication network; pointer signal; FSK; DSM; orthogonal detection

0 引 言

电网专用通信设备是电力系统运行中不可或缺的一部分,确保了电力系统的稳定运行和有效管理^[1]。电力通信网络广泛运用同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH),其中骨干通信网采用高速传输网络传输数据,支持各种业务和应用

的运行^[2]。

新一代电力通信网络数据量大,对信号的可靠性和实时性要求高^[3]。根据 IEC61850 标准,电力通信网络中的通信时延为端到端的时间延迟,包括发送节点和接收节点的处理时延以及网络传输时延。提高骨干通信网的传输容量,提升传输速度十分重要^[4]。SDH 网络传输单元称为同步传送模块

收稿日期:2024-11-17; 修回日期:2025-01-23; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家电网有限公司科技项目资助(52993923000J)

作者简介:刘军(1970—),男,北京人。高级工程师,硕士,主要研究方向为电力通信网络和系统设计。

通信作者:黄丽艳,正高级工程师。E-mail:liyan.huang@accelink.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

(Synchronous Transport Mode, STM), 本文将其中的信息净负荷称为业务数据, 段开销和管理指针单元称为指针信息。传统方案先传输指针信号, 再传输业务数据, 在面对突发指令时无法及时响应。因此有方案直接将指针信号或一些监控信号与业务数据叠加进行传输, 但由于其指针信号大多采用简单的强度调制, 很难实现对微弱指针信号的高准确度检测。加大指针信号的调制深度可以提高其检测灵敏度, 但会增加业务信号的功率代价。

为了解决上述问题, 本文提出了一种采用频移键控(Frequency-shift keying, FSK)传递指针信息的方案以提高指针信号的检测灵敏度, 使得指针信号可以以较低的调制深度叠加在业务信号上共同传输。在接收侧, 微弱的指针信号先由单个光电二极管直接检测再通过电域拍频相干解调的方式被正确恢复。本方案缓解了指针信号灵敏度与业务信号功率代价之间的矛盾。此外, 本文提出将承载指针信号的 FSK 信号进行 Delta-Sigma 调制(Delta-Sig-

ma Modulation, DSM)。DSM 后 FSK 信号的连续波形被转换为二进制序列, 可通过原有电网物理层设备发送, 使得本文所提方案可在原生的电网设备上直接应用。

1 低时延 STM 帧传输系统

传统 STM 帧传输系统面对突发响应时无法及时响应, 有许多研究人员提出了将指针信号和业务信号一起传输的方案以解决时延问题^[5-9], 被称为直接叠加传输方案, 但此方案对指针信号大多采用简单的强度调制, 所需调制深度较高, 这会提高业务通道解调算法的复杂度或占用多个通道。而本文所提的一种低时延 STM 帧传输系统, 不需要改变接收端模块和业务信道数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)算法, 同时指针信号也可凭借简单的解调算法实现高灵敏度的检测。各指针和业务信号叠加传输方案核心技术点及有益效果或限制如表 1 所示。

表 1 各指针和业务信号叠加传输方案核心技术点及有益效果或限制

Table 1 Technical points and beneficial effects or limitations of each pointer and service signal overlay transmission scheme

文献	核心技术点	有益效果(限制)
[5]	采用时分复用通道管理波分无源光网络	需额外占用一个通道
[6]	采用加性和乘性干扰消除算法 处理指针信号	需要额外的 DSP 算法处理指针信号
[7]	采用平均及模值计算 分离业务与指针信号	需要额外的 DSP 算法处理指针信号
[8]	采用包络检测降低指针信号 对业务信号的损伤	需要额外的 DSP 算法处理指针信号且调制深度较大
[9]	基于类似最大似然序列估计的算法 建模和分离业务与指针信号	需要额外极其复杂的算法处理指针信号
本文	光域信号分离 高灵敏度极简指针信号接收	无需改动原始模块的业务通道 高灵敏度探测以降低调制深度 不占用额外通道, 不依赖于帧结构, 自由度更广

本文所提低时延 STM 帧传输方案如图 1 所示, 单独提取原始帧结构中的指针信息调制成一个微小低频信号, 与高速业务数据混合后同步传输。由图可知, 传统传输方案首先传输指针信息, 在面对突发的指令时需要等待至接收到下一帧的指针信息, 引入的时延 Δt 最大可达 1 帧持续时间, 而本方案提出的混合传输系统由于指针信息和业务数据同步传输, 可以在指令下达的同时进行响应而不影响业务数据的传输。具体的信号传输系统流程图如图 2 所示, 指针信号如图 3(a)所示, 首先对需要传输的

指针信息进行 FSK 调制, 用频率分别为 f_1 和 f_2 的正弦信号代替原本 1 和 0 的数字信号, 在指针信号幅度为 1 处和 0 处分别生成一段频率为 f_1 和 f_2 的正弦信号, 指针信号转换的连续模拟波形如图 3(b)所示。考虑到原电网传输系统无法传输模拟波形, 为了避免添加额外的模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)和数/模转换器(Digital-to-Analog Converter, DAC)。本文提出通过模拟波形进行 DSM 以将 FSK 信号的模拟波形转换成数字序列, 如图 3(d)所示。

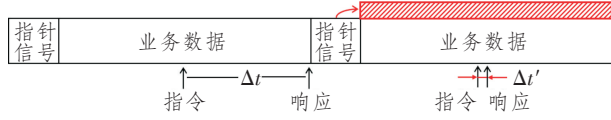


图 1 低时延的 STM 帧传输方案示意图

Figure 1 Schematic diagram of low latency STM frame transmission scheme

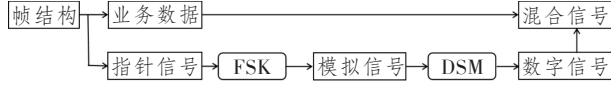


图 2 指针信号和业务信号叠加同步传输方案流程图

Figure 2 Flowchart of synchronized transmission scheme with superimposed pointer signal and payload signal

其中 DSM 调制器结构如图 3(c)所示。调制过程如下:首先,对输入模拟波形过采样,当量化噪声的总功率一定时,由于高采样率带来的频带扩展,使得落在信号频带范围内的噪声功率降低,在接收端通过低通滤波即可滤除信号频带范围外的噪声。随后,经过一比特量化,输入的模拟波形转换为数字比特流。在比特流信号的频谱中,输入模拟信号的频谱不变,而量化噪声则被 DSM 调制器整形至高频

部分。其中量化噪声的分布,与所使用的 DSM 调制器的噪声传递函数一致^[10]。假设输入信号和输出信号分别为 $x(n)$ 和 $y(n)$,其对应的 z 变换分别为 $X(z)$ 和 $Y(z)$,噪声的 z 变换为 $E(z)$,积分器的传递函数为 $H(z)$,那么输出信号和输入信号的关系可表示为

$$[X(z) - Y(z)] \cdot H(z) + E(z) = Y(z), \quad (1)$$

$$Y(z) = STF \cdot X(z) + NTF \cdot E(z), \quad (2)$$

式中: STF 为信号传递函数; NTF 为噪声传递函数,分别表示为

$$STF = \frac{H(z)}{[1 + H(z)]}, \quad (3)$$

$$NTF = \frac{1}{[1 + H(z)]}。 \quad (4)$$

本文所提 DSM 的信号是用于频率调制指针信号的两个高/低频率正弦信号,其为频率很低的双音信号,不同于以往 DSM 相关研究中的宽谱信号。一阶 DSM 和高阶 DSM 在低频信号处的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 是接近的^[11]。然而,高阶 DSM 结构更加复杂且更不稳定^[12-13],因此本研究中的 DSM 调制器采用一阶结构。

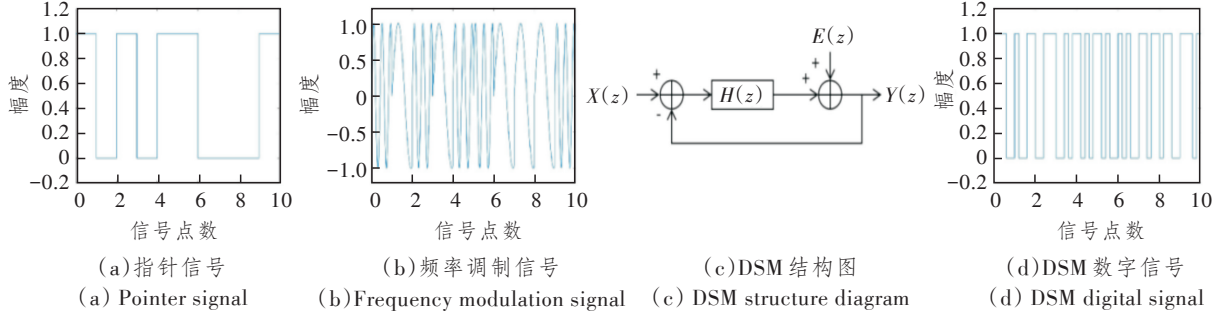


图 3 指针信号和频率调制信号生成示意图

Figure 3 Schematic diagram of pointer signals and frequency modulated signals

在实际传输过程中,假定原指针信号的频率固定,FSK 的两个调制频率确定,则指针信号单个数据点对应的调制后数字信号也是固定的。可将指针信号 01 幅度值对应的数字信号存储在本地,在传输时直接使用原传输端口根据指针信号输出调制后数字信号,这样就不需要添加实时 DSM 处理部分,使得该方案可以更好地直接应用于原生电网通信设备。经 DSM 后的指针信号幅度缩小后直接叠加在业务信号上进行传输。混合信号在接收端通过双工器,一部分被用于直接解调业务信号,另一部分经过低通滤波后被恢复为模拟波形,在原始指针信号单个数据点对应的模拟信号中用两个频率等于调制频率的本地正弦信号分别和模拟信号相乘并积分,根

据积分值的相对大小进行判决,认为较大的积分值对应的正弦信号的频率为此处的原调制频率,从而恢复原始指针信号。在下文的仿真部分会根据混合信号的频谱表现详细分析本文所提方案的 SNR 增益。

2 基于 FSK 的 STM 帧信号同步传输分析

本研究通过仿真证明了采用 FSK 调制的指针信号和业务信号同步传输质量优于二者直接叠加传输。在 Matlab 软件平台搭建的仿真系统如图 4 所示, R 为最终指针数字信号幅度和业务数据数字信号幅度之比,即调制深度。此处取业务数据数字信

号频率为 150 MHz, 指针数字信号频率为 1 MHz。在直接将指针信号经幅度缩放后叠加到业务数据信号的情况下, 向混合信号添加噪声, 检测业务数据信号和指针信号的误码率(Bit Error Rate, BER)。在采用 FSK 调制并通过 DSM 转换为数字序列的情况下, 分别用 10 和 5 MHz 代替原指针信号的 1 和 0 信号幅度, 将指针信号调制为 FSK 信号, 然后对

该频率调制信号进行 DSM, 将得到的数字信号经幅度缩放后叠加在业务数据数字信号上, 向混合信号添加噪声以控制接收端接收信号的 SNR。在接收侧, 对接收到的混合信号进行低通滤波, 使用频率分别为 10 和 5 MHz 的本地正弦信号与混合信号相乘并积分, 根据积分值的相对大小解调指针信号, 检测不同 SNR 下指针信号的 BER。

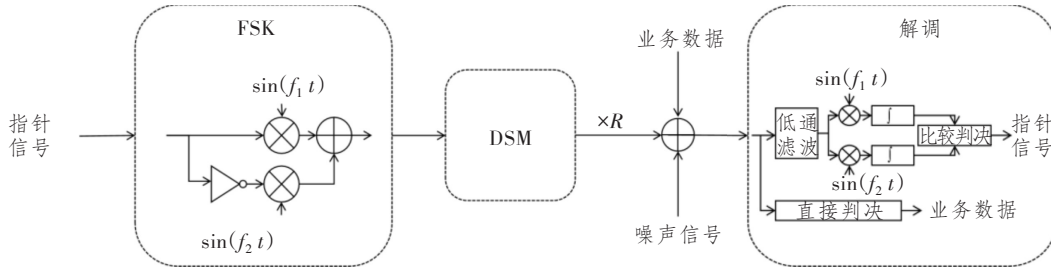


图4 仿真原理框图

Figure 4 Simulation principle block diagram

图5所示为直接将指针信号经幅度缩放后叠加在业务信号上的混合信号时域示意图, 图6所示为混合信号的频域示意图和混合信号中心处的放大示意图。由于指针信号和数字信号的叠加, 混合信号在时域上出现频率较低的突起。频域上在指针信号的频率值 1 MHz 处可见明显信号。

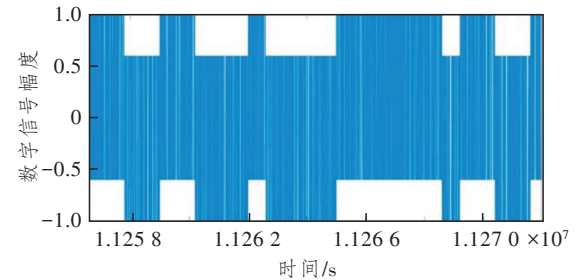


图5 直接叠加混合信号时域示意图

Figure 5 Schematic of time-domain directly superimposed mixed signal

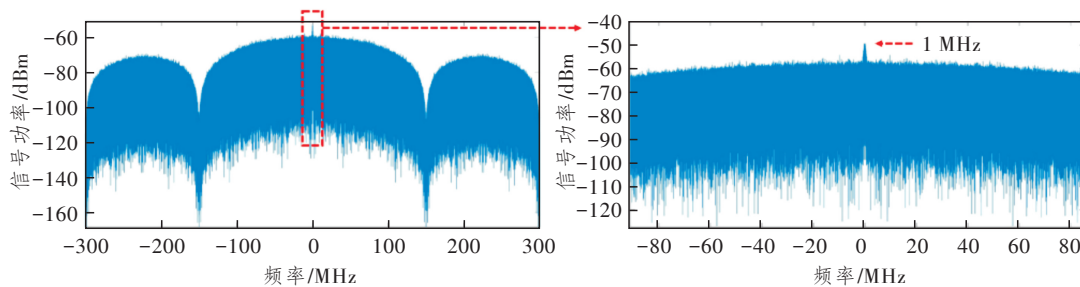


图6 直接叠加方案混合信号频谱及中心处放大示意图

Figure 6 Schematic of the mixed signal spectrum and amplification at the centre of the direct stacking scheme

通过向混合信号中添加不同大小的加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)可以控制混合信号的 SNR, 在接收端检验业务信号和指针信号的 BER 以验证直接叠加方案的性能。图7所示为在直接叠加指针信号幅度的情况下, 不同调制深度 R 下业务数据信号 BER 与 SNR 的关系图。取误码门限为 3.8×10^{-3} , 当检测 BER 低于误码门限时, 认为通过前向纠错码(Forward Error Correction, FEC)可实现纠错。在无指针信号即 $R=0$, 混合信号 SNR > 8.9 dB 时, 接收端业务信号检测 BER 低于误

码门限, 因此理想的调制方案应该在 SNR > 8.9 dB 时使指针信号和业务数据信号在接收端都可以被准确识别。

随着调制深度 R 的增加, 在叠加信号 SNR 相同时, 业务数据数字信号 BER 增加, 这是由于 R 的增加表示指针信号的幅度增加, 在叠加后对业务数据信号造成的功率代价加大, 使得业务数据信号在接收端更容易被误判。图8所示为误码门限内不同 R 所引起的业务信号功率代价。如图所示, 随着 R 的增加, 为了正确解调业务信号, 所需要的 SNR 也

需要增大。为了不影响业务信号的检测,可以提升更低 R 下指针信号的检测性能,考虑到指针信号相对频率较低,可在接收端设置 1 个低通滤波器。考察 $SNR=8.9$ dB 时不同 R 情况下指针信号的检测性能。

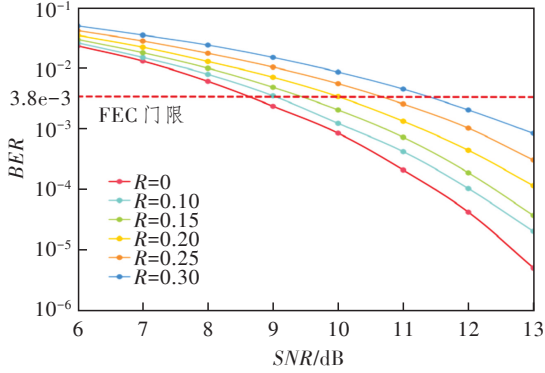


图 7 不同调制深度 R 下直接叠加方案业务数据信号 BER 和 SNR 关系图

Figure 7 Relationship between BER and SNR of payload signals of direct overlay scheme at different modulation depth R

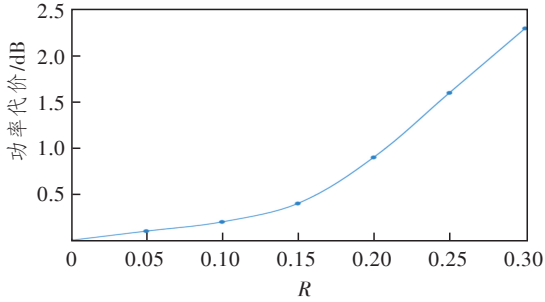


图 8 直接叠加方案业务信号功率代价与调制深度 R 关系图

Figure 8 Relationship between payload signal power penalty and modulation depth R of the direct overlay scheme

图 9 所示为低通滤波器带宽为 0.5 MHz,直接叠加方案指针信号 BER 和调制深度 R 的关系图。在混合信号 $SNR=8.9$ dB 且指针信号 BER 低于误码门限时,最低 $R=0.25$ 。结合图 8 可得 $R=0.25$ 时满足误码门限要求的 $SNR=10.5$ dB,业务数据功率代价损失为 1.6 dB。因此,直接将指针信号数字信号叠加在业务数据数字信号上进行混合传输的方案需要优化。

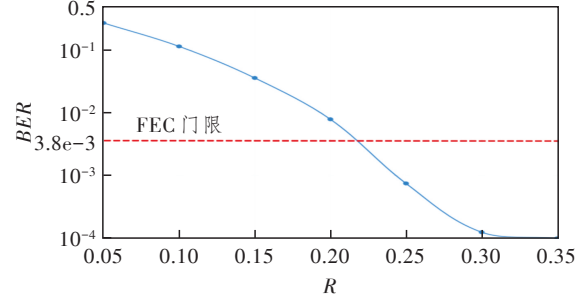


图 9 $SNR=8.9$ dB 时直接叠加方案指针信号 BER 和调制深度 R 关系图

Figure 9 Relationship between BER and modulation depth R of the pointer signal of the direct overlay scheme at a SNR of 8.9 dB

图 10 所示为本文所提采用 FSK 调制方式的混合信号频谱和中心处放大示意图,在指针信号进行频率调制的高/低调制频率处即 5 和 10 MHz 处可见明显的信号峰。在解调指针信号的过程中,业务信号是主要的干扰,可视作噪声。对比图 10 和图 6 可知,在相同调制深度 R 下,使用 FSK 调制叠加方案指针信号的频谱高于业务信号约 30 dB,而直接叠加下指针信号的频谱仅高于业务信号约 5 dB,这表明基于 FSK 的叠加方案指针信号 SNR 获得了大幅的提升。

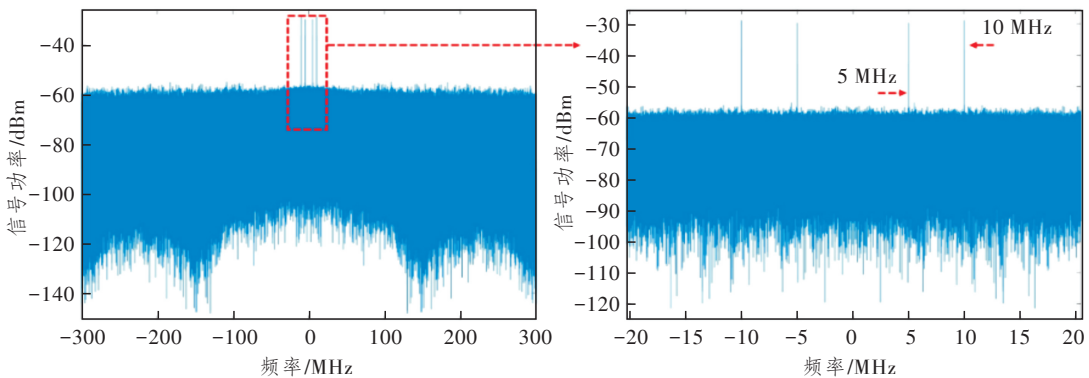


图 10 采用 FSK 调制方式的混合信号频谱和中心处放大示意图

Figure 10 Schematic of the mixed signal spectrum and amplification at the centre using FSK modulation

由上文对图 7 的分析可知,当 $SNR=8.9$ dB 时 不叠加指针信号的业务信号在接收端 BER 低于误

码门限。因此选择 $SNR=8.9$ dB 的情况对采用 FSK 调制的叠加方案进行性能分析。图 11 所示为采用 FSK 调制且 $SNR=8.9$ dB 时,指针信号 BER 和调制深度 R 的关系图,发现当 $R=0.05$ 时,指针信号在接收端 $BER=1.45e-2$,高于误码门限;而当 $R=0.06$ 时,指针信号在接收端 $BER=3e-3$,低于误码门限。说明采用 FSK 调制方式的信号叠加方案在指针信号检测 BER 低于误码门限时,最小的 $R=0.06$,而结合图 7 可知, $R=0.06$ 时所造成的功率代价仅为 0.1 dB 左右。

综上所述,直接将指针信号叠加在业务信号上进行传输的方案在接收端指针信号检测 BER 低于误码门限时,调制深度 R 至少应为 0.25,此时满足误码门限造成的功率代价为 1.6 dB;而本文所提采用 FSK 调制的叠加方案,指针信号在接收端检测 BER 低于误码门限时, R 至少应为 0.06,此时所造成的功率代价约为 0.1 dB。证明采用 FSK 的叠加方案相较于直接叠加方案指针信号的检测灵敏度有较大提升,因此可在更低的 R 下传输指针信号,从而减小对业务信号的影响。采用本文所提方案相较于传统直接叠加方案对业务信号造成的 SNR 代价可降低约 1.5 dB。这部分 SNR 裕量可为长距离电力通信网络传输提供更长传输距离抑或是提升光信噪比(Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR)容限的鲁棒性。

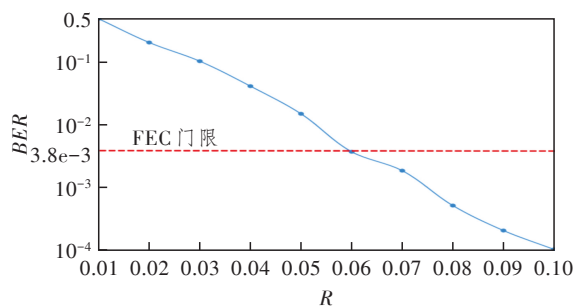


图 11 $SNR=8.9$ dB 时采用 FSK 调制方式的叠加方案指针信号 BER 和调制深度 R 关系图

Figure 11 Relationship between the BER and modulation depth R of the pointer signal using FSK modulation method at a SNR of 8.9 dB

3 结束语

本文针对新一代电网专用通信设备传输业务越来越高的时延要求,提出了一种电网 STM 帧结构指针信号和业务数据信号低时延同步传输的方案。首先对指针信号进行 FSK 调制,将指针信号转变为

连续的模拟波形,再将模拟波形 DSM 转变为数字信号,缩小该数字信号幅度后叠加到业务数据数字信号上进行混合传输。混合信号在接收端通过双工器,一部分直接检测业务数据,另一部分经过低通滤波后与频率等于 FSK 调制频率的本地正弦信号相乘并积分,通过对比积分值获得原始指针信号。仿真发现,在直接将指针信号叠加在业务信号进行传输的情况下,当指针信号在接收端 BER 低于误码门限时,最低调制深度 $R=0.25$,满足误码门限的 $SNR=10.5$ dB,此时业务数据功率代价为 1.6 dB。而采用 FSK 调制指针信号的叠加传输方案在接收端指针信号检测 BER 低于误码门限时,最小 $R=0.06$,满足误码门限的 SNR 约为 9 dB,业务数据功率代价仅为 0.1 dB 左右。仿真结果表明,本文所提基于 FSK 的共传输方案相较于传统直接叠加方案对业务信号造成的 SNR 代价可降低约 1.5 dB。此外,本方案可直接兼容现有的电网设备物理层,在有低延迟调控需求的电网专用通信设备中有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 卢超,唐大童,葛萌,等. 基于电力骨干传输网的通信业务运行方式分析[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(5): 81-88.
Lu C, Tang D T, Ge M, et al. Analysis of Communication Service Operation Modes based on Power Backbone Transmission Network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(5): 81-88.
- [2] 张阁,张頔,王晓峰,等. 东北电网骨干传输网规划分析[J]. 吉林电力, 2019, 47(1): 7-9.
Zhang G, Zhang X, Wang X F, et al. Planning Analysis of Backbone Transmission Network in Northeast Region[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(1): 7-9.
- [3] GB/T38438-2019, 电力通信网运行评估指标体系[S].
GB/T38438-2019, Operational Evaluation Index System for Electric Power Communication Network[S].
- [4] 王娟. 电力通信骨干传输网光缆重载段识别方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
Wang J. Research on Identification Method of Overloaded Segment of Optical Cable in Power Communication Backbone Transmission Network[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2022.
- [5] 王志军,刘新峰. WDM PON 系统的辅助管理控制装置及方法: 中国, CN108259118B[P]. 2019-12-17.

- Wang Z J, Liu X F. Auxiliary Management Control Device and Method for WDM PON system; China, 108259118B[P]. 2019-12-17.
- [6] 杨川川,许兆鹏,谈仲伟,等. 一种信号处理方法及装置:中国,CN201810067078.3[P]. 2019-07-30.
- Yang C C, Xu Z P, Tan Z W, et al. A Signal Processing Method and Device; China, CN201810067078.3[P]. 2019-07-30.
- [7] Igarashi R, Koma R, Hara K, et al. Simultaneous Reception of AMCC Signals and QPSK Signals by a Single Coherent Receiver with DSP[J]. Optics Express, 2022, 30(26): 48030.
- [8] Wang J, Shen W, Chen J, et al. Auxiliary Management and Control Channel (AMCC) for Coherent Frequency-Division-Multiplexing (FDM) PON[J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(3): 7201009.
- [9] Guo H, Yang C, Gao Y, et al. Interference Modeling and Joint Demodulation Receiver for Multi-Level PON with Baseband AMCC Superimposition[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(6): 1916–1926.
- [10] 吴自强. 基于Delta-Sigma调制的低成本光传输技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Wu Z Q. Research on Low-Cost Optical Transmission Technology based on Delta-Sigma Modulation [D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [11] 鲁少卿. 高性能Sigma-Delta模数转换器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- Lu S Q. Research and Design of High Performance Sigma-Delta Analog-to-Digital Converter[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [12] 吴自强, 钟林晟, 谭大勇, 等. 基于搜索算法的前传Delta-Sigma调制器优化设计[J]. 光通信研究, 2022(2): 61–68.
- Wu Z Q, Zhong L S, Tan D Y, et al. Optimal Design of Mobile Fronthaul Delta-Sigma Modulator based on Search Algorithm [J]. Study on Optical Communications, 2022(2): 61–68.
- [13] Zou Y, Li B R, Zhong L S, et al. DSM-based Ultra-Low-Latency ONU Activation for Uninterrupted TDM-PON Services[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(1): 128–135.