

基于嵌入式硬件设计的卫星通信技术研究

马卓斌[†], 金冰鑫, 田甜, 马文卓

(国网宁夏电力有限公司固原供电公司, 宁夏 固原 756000)

摘 要:为提高卫星通信终端系统的调制格式识别能力和抗噪性能,提出了一种基于改进型神经网络算法的卫星通信终端系统。该系统通过基带处理模块和射频模块,实现对接收信号的调制格式识别和去噪处理。基带处理模块采用改进型混合神经网络算法和门控神经单元算法,能有效识别接收信号的调制格式。射频模块采用小波分解和自适应阈值算法,实现对接收信号的高效去噪处理。同时,该系统还具有较强的抗干扰能力,提高了卫星通信终端系统的整体性能。经过实验,在光信噪比(OSNR)为 10 dB 的环境下,本文系统对于无线通信信号的调制格式识别准确率为 100%;在光信噪比为 30 dB 时,本文系统对于卫星无线通信信号的调制格式识别准确率为 97.9%,满足卫星通信终端对信号接收的需求。

关键词:调制格式识别;门控神经单元;自适应阈值算法;卫星通信终端

中图分类号:TN927.2;TP391.4

文献标识码:A

Research on Satellite Communication Technology Based on Embedded Hardware Design

MA Zhuobin[†], JIN Bingxin, TIAN Tian, MA Wenzhuo

(State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Guyuan Power Supply Company, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: To improve the modulation format recognition ability and noise resistance performance of satellite communication terminal systems, this paper proposes a satellite communication terminal system based on an improved neural network algorithm. This system achieves modulation format recognition and denoising processing of received signals through baseband processing modules and RF modules. The baseband processing module adopts an improved hybrid neural network algorithm and a gate controlled neural unit algorithm, which can effectively identify the modulation format of the received signal. The RF module adopts wavelet decomposition and adaptive threshold algorithm to achieve efficient denoising processing of the received signal. At the same time, the system also has strong anti-interference ability, which improves the overall performance of the satellite communication terminal system. After testing, the system achieved an accuracy of 100% in identifying modulation formats for wireless communication signals in an environment with an optical signal-to-noise ratio of 10 dB. At an optical signal-to-noise ratio of 30 dB, the system achieved an accuracy of 97.9% in identifying modulation formats for satellite wireless communication signals, meeting the signal reception requirements of satellite communication terminals.

Key words: modulation format recognition; gate controlled neural unit; adaptive threshold algorithm; satellite communication terminal

现有的卫星通信终端系统存在信号调制格式识别不准确以及抗干扰能力较弱的问题,难以满足

收稿日期:2024-09-19

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229GY240002)

作者简介:马卓斌(1986—),女,宁夏固原人,硕士,高级工程师,研究方向:计算机通信技术。

[†] 通信联系人, E-mail: shuigeng98@126.com

恶劣环境下的通信需求。为了提高卫星通信终端系统的调制格式识别能力和抗噪性能,迫切需要开发一种新型的卫星通信终端系统,其具备自适应调制格式识别和高效抗噪干扰等特点,从而提升通信质量,确保数据传输的可靠^[1]。

为此,文献[2]提出了一种自适应盲分离算法的卫星通信终端系统。该系统以自适应变步长动量项 EASI 算法为基础,通过自适应调整步长和动量项因子提高了算法在混合矩阵突变阶段的分离性能,提高信号处理能力。但该方案也存在一些缺点,如对信号的稀疏性要求较高。文献[3]提出了一种神经网络算法的卫星通信终端系统。该系统通过基于 GPU 的卫星通信基带算法群,实现了卫星通信下行链路的高速处理。基于 GPU 的软件无线电方案开发较传统方案更加便捷高效。但该方案也存在一些缺点,如无法很好地处理非平稳信号。文献[4]提出了一种基于深度学习算法的卫星通信终端系统。该系统通过融合 Seq2Seq 和 LSTM 网络,建立卫星无线通信模型,提高了预测的准确性和适用性,但该方案也存在一些缺点,如对噪声环境的鲁棒性较差。文献[5]提出了一种基

于改进的 LDPC 解码算法的卫星通信终端系统。该系统通过引入了信道接收信息,并设计了外部信息与映射处理信息之间的相关可靠性,以提高对接信号调制格式识别的准确率。但该方案也存在一些缺点,如特征提取过程需要大量的人工干预。

现有的卫星通信终端系统在恶劣环境下存在调制格式识别不准确以及抗干扰能力较弱的问题。本研究提出了一种基于改进型神经网络算法的卫星通信终端系统。该系统通过采用改进型混合神经网络算法和小波分解算法,提高了调制格式识别和抗噪能力,并利用自适应阈值算法实现了对接收信号的有效去噪^[6]。该卫星通信终端系统能为恶劣环境下的卫星通信提供可靠的数据传输,确保通信质量。

1 卫星通信终端系统设计

卫星通信终端系统包含接口模块、时钟模块、终端处理模块、蓝牙模块、基带处理模块、数字信号处理器、射频模块、天线模块和电源管理^[7]。卫星通信终端系统架构图如图 1 所示。

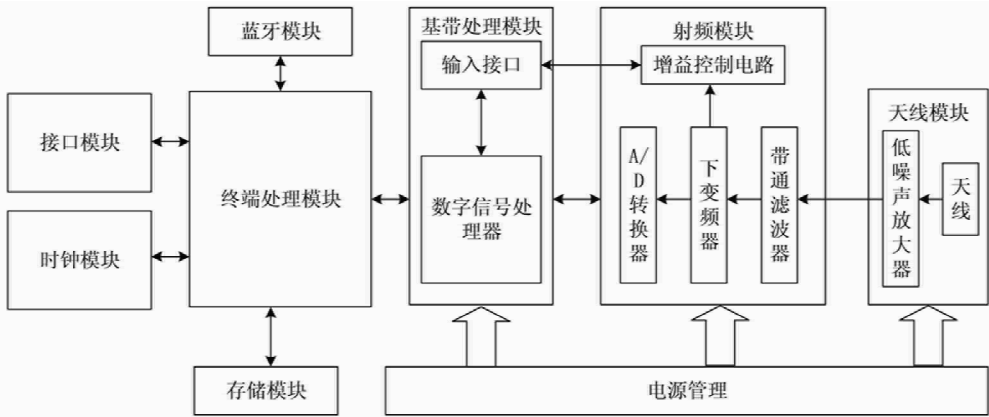


图 1 卫星通信终端系统架构图

由图 1 可知,天线模块包括低噪声放大器和天线本体。天线本体包含单极天线、偶极天线、反射器天线和阵列天线,天线模块可以根据不同的工作场景和频段需求选择适配的天线进行接收。低噪声放大器位于天线与射频模块之间,负责对接收到的微弱信号进行初步放大,以提高信号幅度并降低噪声对信号的影响。

射频模块包含增益控制电路、带通滤波器、下变频器和 A/D 转换器。增益控制电路负责调节接收信号的增益,以保证信号幅度在合适范围内^[8]。带通滤波器则用于滤除无用频带的信号,只保留目

标频段的信号。下变频器将高频射频信号转换为中频或低频信号。A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号。

基带处理模块负责处理卫星通信中物理层基带部分。基带处理模块接收到天线传输的信号后对数据进行编码和解码,再进行加扩和解扩的信号处理,确保接收信号的完整性和抗干扰能力,最后由调制解调电路对信号进行幅度、相位和频率的调制和解调,实现数字信号的无线传输。

终端处理模块作为卫星通信终端系统的核心控制角色,其与接口模块相连,通过接口模块与外

部设备建立数据传输通道,实现信息交互。终端处理模块利用时钟模块提供时间基准对系统进行同步和数据处理。存储模块保存的系统数据和程序供终端处理模块完成各种数据计算。终端处理模块与蓝牙模块相连,可以通过无线连接与其他蓝牙系统进行数据交互和控制。

2 基带处理模块设计

基带处理模块包含电源单元、调制模块、数据信号处理器、EEPROM 存储器、SRAM 存储器和 JTAG 标准化接口^[9]。基带处理模块硬件结构图如图 2 所示。

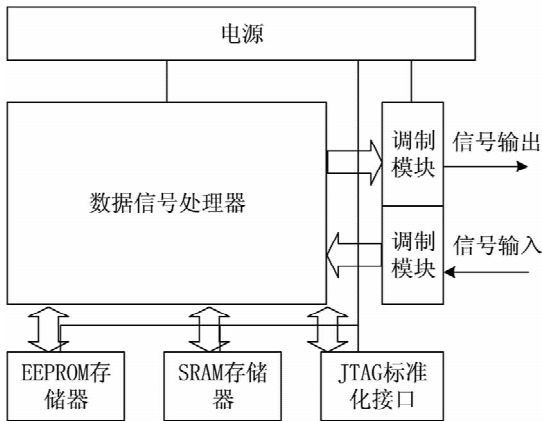


图 2 基带处理模块硬件结构图

由图 2 所示,基带处理模块主要负责处理卫星通信中物理层基带部分。由于接收信号的调制格式不同,因此需要采用不同的调制和解调方法。调制模块识别出正确的调制格式后,将数据传输给数据信号处理器。数据信号处理器连接 EEPROM 存储器、SRAM 存储器和 JTAG 标准化接口,EEPROM 存储器和 SRAM 存储器为调制模块提供了必要的存储空间,用于存储调制解调所需的参数和算法。JTAG 标准化接口则为调制模块提供与外部设备进行通信的接口,方便对数据信号处理器进行配置和控制。

针对不同的接收信号的调制格式难以快速识别问题,本文设计采用改进型混合神经网络算法对接收信号进行分析识别。任何一种接收信号的调制格式都可以用唯一的星座图表示,改进型混合神经网络算法会自学习识别接收信号的星座图进行接收信号的调制格式识别。卷积神经网络算法优势在于能很好地提取图片里的抽象特征,有效地减少频率分量和无效数据^[10]。深度学习网络算法优

势在于能将特征通过非线性映射到更加容易分离的特征空间。改进型混合神经网络算法将卷积神经网络算法和深度学习网络算法相结合,能够更好地识别接收信号的调制格式。改进型混合神经网络系统如图 3 所示。

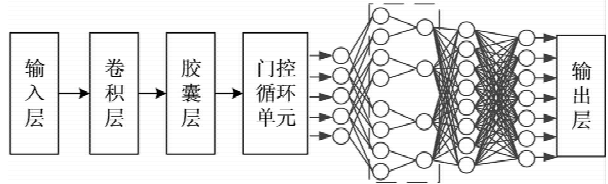


图 3 改进型混合神经网络系统

由图 3 可知,改进型混合神经网络由输入层、卷积层、胶囊层、门控循环单元、深度学习网络层和输出层组成。输入层选择 2×129 维度,其中 2×128 维度用于接收端的调制数据, 2×1 维度用于计算高阶累计量。输出层输出有四种调制格式,分别为 DPSK、DQPSK、D8PSK、16QAM 调制格式。

改进型混合神经网络中卷积层采用两次卷积操作,第一个卷积层提取图像局部特征信息,第二个卷积层进一步提取信号的深层次特征。胶囊网络采用从低层胶囊到高层胶囊映射的形式处理特征,使用胶囊神经元以向量形式保存胶囊神经元特征关系,由 i 个维度为 d 的低层胶囊映射到 j 个 d' 维的高层胶囊向量,则高层胶囊向量 v_j 可表示为:

$$v_j = \text{squash}(\sum_{ij} \mathbf{W}_{ij} \times \mathbf{u}_i) \quad (1)$$

式中, v_j 表示第 j 个高层胶囊的输出向量, $\mathbf{W}_{ij}$ 是从第 i 个低层胶囊对第 j 个高层胶囊的 $d' \times d$ 维转换矩阵, $\mathbf{u}_i$ 是第 i 个低层胶囊的输出向量, squash 是一个非线性函数。

门控神经单元常用于处理序列数据的建模,其通过引入重置门和更新门两个门控机制来解决长期依赖问题。重置门决定了当前时刻的隐藏状态与前一时刻的隐藏状态之间的依赖程度,其主要控制来自前一时刻的信息应该被遗忘或重置。更新门则决定了当前时刻的隐藏状态应该从前一时刻的隐藏状态和当前时刻的输入中获取多少信息,它控制了当前时刻的隐藏状态应该保留多少来自前一时刻的信息。门控神经单元的示意图如图 4 所示。

门控神经单元的重置门的输出 r_t 可表示为:

$$r_t = \sigma(\mathbf{W}_r \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_r) \quad (2)$$

式中, r_t 表示重置门的输出数据, σ 是 sigmoid 激活函数,负责将输入映射到 $[0, 1]$ 区间, $\mathbf{W}_r$ 是与重置门相关的权重矩阵, h_{t-1} 是前一时刻的隐藏状态, x_t 是当前时刻的输入, b_r 是与重置门相关的偏

置项。

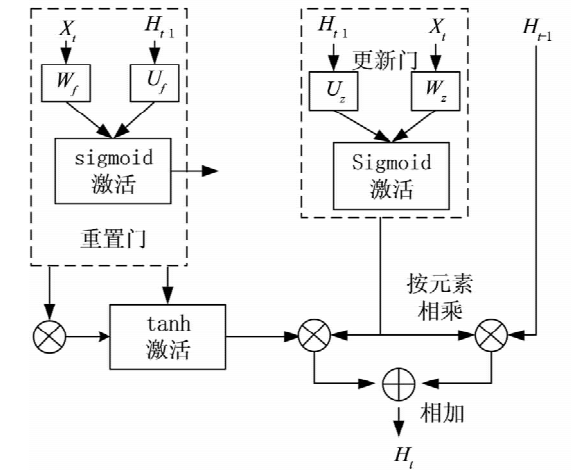


图 4 门控神经单元的示意图

门控神经单元的更新门的输出 z_t 可表示为：

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_z)$$
 (3)

式中， z_t 表示更新门的输出数据， W_z 是与更新门相关的权重矩阵， b_z 是与更新门相关的偏置项。

门控神经单元的候选隐藏状态 $\tilde{h}_t$ 可表示为：

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_h \cdot [r_t \times h_{t-1}, x_t] + b_h)$$
 (4)

式中， $\tilde{h}_t$ 表示候选隐藏状态， $\tanh$ 是双曲正切激活函数，负责将输入映射到 $[0, 1]$ 区间， W_h 是与候选隐藏状态相关的权重矩阵， r_t 是重置门的输出， b_h 是与候选隐藏状态相关的偏置项。

改进型混合神经网络算法结合了门控神经单元、神经网络算法和卷积神经网络的优势能够快速、准确地识别出接收信号的调制格式。

3 射频模块设计

射频模块包含射频收发芯片、功率放大器、双工器、射频开关单元、天线调制模块、滤波单元和低噪声放大器组成^[11]。射频模块硬件结构图如图 5 所示。

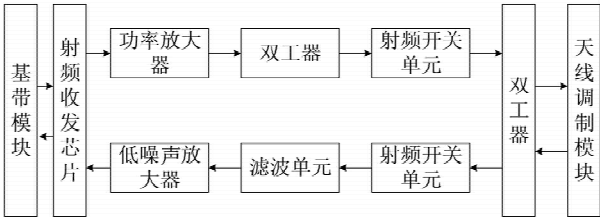


图 5 硬件射频模块硬件结构图

由图 5 可知，当信号发送时，信号会进入射频收发芯片，该射频收发芯片负责对基带信号进行调制和上变频，转换成所需的射频载波信号。然后信

号会被功率放大器放大至所需的发射功率水平。双工器负责在发送和接收之间进行切换，实现信号的双向传输。射频开关单元则控制信号在发送和接收路径之间的切换。当接收信号时，天线会捕获来自空间的射频信号，通过天线调制模块将其输入。双工器再次负责在发送和接收之间切换^[12]。射频开关单元控制信号的路径选择。滤波单元对接收信号进行带通滤波。低噪声放大器对滤波后的弱信号进行放大，同时尽可能降低噪声。最后，射频收发芯片负责对放大后的信号进行下变频和解调，恢复出原始的基带信号。

针对射频模块中存在的噪声干扰问题，设计采用改进型混合神经网络算法对接收信号进行去噪处理。改进型混合神经网络算法结合了卷积神经网络和深度学习网络的优势，卷积神经网络擅长提取信号中的特征，能够有效地分离出噪声成分；深度学习网络可以将特征映射到更加易于分类的特征空间，有助于更准确地识别出有效信号成分^[13]。通过改进型混合神经网络算法的自学习机制，能够自适应地分析卫星接收信号的特征，准确地分离出噪声成分，从而实现对接收信号的高效去噪处理。改进型混合神经网络算法处理接收信号流程图如图 6 所示。

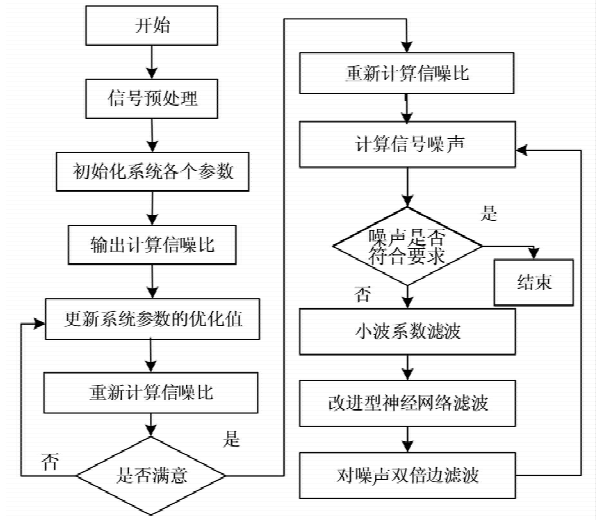


图 6 改进型混合神经网络算法处理接收信号流程图

由图 6 可知，改进型混合神经网络算法采用小波分解方法对接收信号进行多尺度分析，以提取不同频段的关键特征。设计自适应阈值机制，动态调整阈值以有效分离信号和噪声成分。最后，将小波分析结果和自适应阈值处理结果输入改进型混合神经网络模型进行训练学习，提高算法的信号处理性能。

射频模块会采用小波分解算法将接收到的原

始信号 S 平均分为 i 个区间,分别计算每个区间的总能量。

$$E_k = \sum_k^{m/i} |C_j(k)|^2$$

(5)

式中, m 为采样点数, i 为信号区间数, E_k 表示第 k 个信号区间信号能量, C_j 表示第 j 层信号的能量。

其中第 k 个信号区间信号能量 E_k 占总信号小波系数总能量 E 比值 P_k 可以表示为:

$$P_k = E_k/E$$

(6)

式中, E 表示信号总能量, E_k 为第 k 个信号区间小波系数的总能量, P_k 为信号小波能量占比。

改进型混合神经网络算法中去噪自适应阈值门限 μ 可表示为:

$$\mu = \sigma \sqrt{2\ln(N)/\ln(i+1)}$$

(7)

式中, μ 为每层小波系数的阈值门限, i 为信号区间数, N 是接收信号长度, σ 是噪声估计方差,通过原始信号小波分解后高频系数统计得到。

改进型神经网络算法输出光信比 OSNR 可表示为:

$$\text{OSNR} = \frac{\text{RAP} \sum_{i=1}^N l_i}{e\Delta f}$$

(8)

式中, l_i 表示第 i 层接收信号到的噪声强度, RAP 表示信号光功率, $\sum_{i=1}^N l_i$ 表示信道损耗总和, $e\Delta f$ 表示噪声功率密度。

改进型混合神经网络算法通过评估接收信号光功率、信道损耗和噪声功率密度等性能参数采用自学习机制自动调整去噪阈值,实现自适应的噪声抑制。

4 验证

选取江苏省某航天通信中心实验室进行卫星通信终端系统实验,实验室环境图如图 7 所示。

实验使用国家空间科学数据中心公开发布的数据集。该数据集包含 82570 个信号样本,信号样本的信噪比范围为 $-6\sim 12$ dB,涵盖 4 种常见的模拟和数字调制信号类型,分别为 DPSK、DQPSK、D8PSK、16QAM 调制格式。实验将 82570 个信号样本中 60000 个数据用于训练模型,剩余 22570 个数据用于测试模型的性能。

为更加直观验证卫星通信终端系统中基带处理模块对卫星无线通信信号的调制格式识别效果,采用文献[2]、文献[3]和本文系统对卫星无线通信信号进行对比实验,实验结果如表 1 所示。

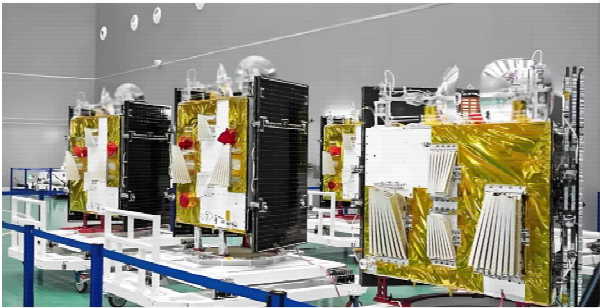


图 7 实验室环境图

表 1 无线信号实验对比表

光信噪比/dB	调制格式识别准确率		
	文献[2]	文献[3]	本文系统
10	93.2%	90.4%	100%
20	90.5%	87.2%	99.5%
30	85.5%	85.9%	97.9%

由表 1 可知,在光信噪比为 10 dB 时,本文系统对于卫星无线通信信号的调制格式识别准确率为 100%,比文献[2]的 93.2% 高 6.8%,比文献[3]的 90.4% 高 9.6%。在光信噪比为 20 dB 时,本文系统对于卫星无线通信信号的调制格式识别准确率为 99.5%,比文献[2]的 90.5% 高 9%,比文献[3]的 87.2% 高 12.3%。在光信噪比为 30 dB 时,本文系统对于卫星无线通信信号的调制格式识别准确率为 97.9%,比文献[2]的 85.5% 高 12.4%,比文献[3]的 85.9% 高 12%。这说明本文系统在大气湍流强度较大的环境下对无线通信信号的调制格式识别均保持较高准确率。

为更加直观验证卫星通信终端系统中基带处理模块对卫星无线通信信号的处理能力,使用地面信号发送装置向卫星通信终端系统发送一段总长度为 10 kB 且相位差为 $\pi/2$ 的正弦信号,发送信号如图 8 所示。

将卫星通信终端系统的基带处理模块接收本振设置为 500 MHz,模块采样速率设置为 30.72 Msps,模块带宽设置为 10 M。接收信号如图 9 所示。

由图 9 可知,该信号的中心频率约为 500.3 MHz 且该信号的频谱峰值点强度为 -7.22 dBm,说明基带处理模块接收信号功率水平处于较强的范围内,符合卫星通信终端系统接收信号要求。

为更加直观验证卫星通信终端系统中射频模块对卫星无线通信信号的滤波去噪效果,本文分别进行文献[2]、文献[3]和本文系统无线信号去噪对比实验,实验结果表如表 2 所示。

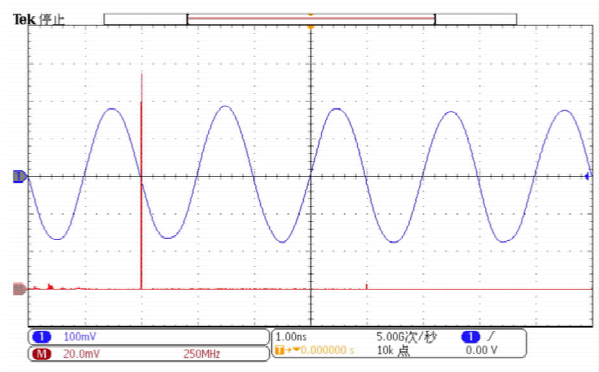


图 8 发送信号实验图

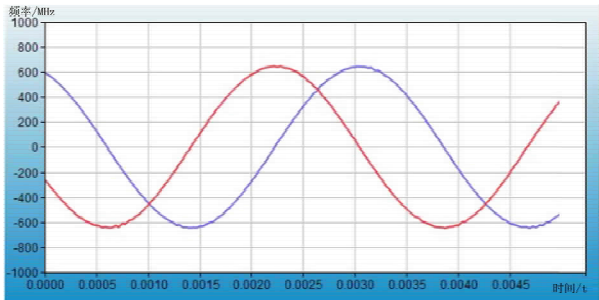


图 9 接收信号实验图

表 2 去噪实验结果表

噪声/ dB	测试性能 指标	信噪比/dB		
		文献[2]	文献[3]	本文系统
10	SNR	8.133	7.383	10.675
20	SNR	17.967	17.099	20.304
30	SNR	27.757	26.752	30.038

由表 2 可知,在处理噪声为 10 dB 的无线信号时,本文系统的信噪比为 10.675 dB,比文献[2]的 8.133 dB 高 2.542 dB,比文献[3]的 7.383 dB 高 3.292 dB。在处理噪声为 20 dB 的无线信号时,本文系统的信噪比为 20.304 dB,比文献[2]的 17.967 dB 高 2.337 dB,比文献[3]的 17.099 dB 高 3.205 dB。在处理噪声为 30 dB 的无线信号时,本文系统的信噪比为 30.038 dB,比文献[2]的 27.757 dB 高 2.281 dB,比文献[3]的 26.752 dB 高 3.286 dB。可以看出,无论是在 10 dB、20 dB 还是 30 dB 的噪声水平下,本文系统都能提供更高的信噪比,去噪效果明显优于文献[2]和文献[3]提出的系统。

为了验证本文系统对无线信号的接收能力,本文使用 MATLAB 对卫星通信终端系统的信号接收衰减系数同能见度 and 频率关系进行仿真实验,生成的衰减系数仿真图如图 10 所示。

由图 10 可知,本文系统在大气能见度较低且信号频率较大的环境下,对无线信号接收的衰减系数较大,随着信号频率的减小和大气能见度的增加,本文系统对无线信号接收的衰减系数会随之减小。本文系统在恶劣环境下的信号接收性能十分优秀。

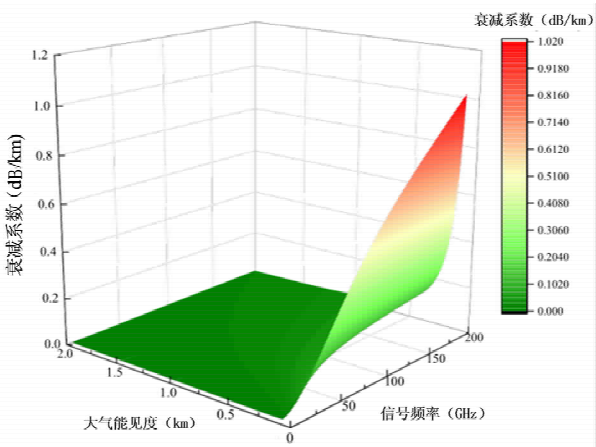


图 10 衰减系数仿真图

5 结 论

针对现有卫星通信终端系统存在调制格式识别不准确和抗噪性能较弱的问题,设计了一种基于改进型神经网络算法的卫星通信终端系统。该系统采用改进型混合神经网络算法和小波分解算法,构建了基带处理模块和射频模块,确保对接收信号的调制格式识别和有效去噪。同时,该系统还将自适应阈值算法和门控神经单元算法相结合,提高了抗干扰能力,为恶劣环境下的卫星通信提供可靠的数据传输。与传统的卫星通信终端系统相比,该系统具备自适应识别和高抗干扰等特点,大幅提升了通信质量和系统性能。

参考文献

[1] 刘薇,刘松林,郭子博,等. 基于模型定义的光学遥感卫星星上处理系统设计[J]. 测绘学报, 2024, 53(4): 689—699.

[2] 秦媛,张杭,朱宏鹏,等. 卫星 MIMO 通信系统抗移动无人机集群干扰的在线 BSS 算法[J]. 计算机工程, 2024, 50(6): 65—76.

[3] 李荣春,周鑫,王庆林,等. 基于 GPU 的卫星通信基带处理高吞吐率并行算法[J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(10): 1720—1730.

[4] ZENG L, ZHANG C, QIN P, et al. One method for predicting satellite communication terminal service demands based on artificial intelligence algorithms[J]. Applied Sciences, 2024, 14(14): 6019—6019.

[5] HE Y, WANG Y. Research on low-density parity-check decoding algorithm for reliable transmission in satellite communications[J]. Applied Sciences, 2024, 14(2): 123—130.

[6] 刘瑾,邓文娟,汪志成,等. 基于 STM32 的工业控制 HMI 系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2024(4): 64—70.

[7] 娄晓康,张立新,张雪媛,等. 基于 Arduino 和 NB-IoT 的棉田环境监测系统设计[J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 6.

[8] 盛汉霖,顾至诚,陈芊,等. 嵌入式分布式架构下航空发动机模型预测控制方法研究[J]. 推进技术, 2023, 44(11): 198—213.

[9] 谈曾奇,陆正亮,张翔. 基于 STM32 的立方体卫星姿控计算机设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(2): 5.

[10] 任伟杰,孙建锋,周煜,等. 多体制兼容相干探测卫星激光通信技术[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1206002.

[11] 黄伟昭,徐曙,陈远,等. 干扰容忍的北斗卫星通信资源灵活分配技术研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2023, 43(6): 19—28.

[12] 杨奇,王宜州,王元祥,等. 低轨卫星激光通信实时算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(1): 0106003.

[13] 王汝言,叶显耀,何鹏,等. 面向非地面网络多 QoS 保障的低地球轨道卫星星座设计[J]. 通信学报, 2023, 44(12): 61—77.