

窄带物联网中下行信道估计算法的研究与优化

方承志,李晨曦,张子渊

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院,江苏 南京 210023)

摘要:支持低功耗广覆盖的广域网新兴技术的窄带物联网(NB-IoT)是物联网市场中增长最快的领域之一,其中的关键技术信道估计是准确恢复发送信号的重要步骤。传统的常数插值、线性插值和DFT等插值算法存在着估计精度和算法复杂度之间的问题。针对NB-IoT系统低功耗的要求,提出一种改进的反距离权重(IDW)插值算法。该算法引入距离权重,将周围已知点与待估点之间的距离进行加权平均,即在时域方向上利用周围导频点对非导频点的影响进行插值。仿真结果显示,该算法的精度优于常数插值和线性插值,略差于DFT插值。与传统信道估计算法相比,该算法提高了估计精度,降低了算法复杂度,均方误差(MSE)也显示有良好的性能。同时在不同信道中有近似的性能,有较好的鲁棒性,可以实现应用。

关键词:窄带物联网;信道估计;插值;反距离权重;加权幂指数

中图分类号:TP391.44;TN929.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2021)09-0099-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2021.09.017

Research and Optimization of Downlink Channel Estimation Algorithm in Narrowband Internet of Things

FANG Cheng-zhi, LI Chen-xi, ZHANG Zi-yuan

(School of Electronic and Optical Engineering, School of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Narrowband Internet of Things (NB-IoT), which supports the emerging technology of wide-area network with low power consumption and wide coverage, is one of the fastest growing areas in the Internet of Things market, where channel estimation, a key technology, is an important step in accurately restoring transmitted signal. Traditional interpolation algorithms, such as constant interpolation, linear interpolation and DFT, have problems between estimation accuracy and algorithm complexity. An improved inverse distance weight (IDW) interpolation algorithm is proposed to meet the requirements of low power consumption in NB IOT system. The distance weight is introduced into the algorithm, and the distance between the known points and the estimated points is weighted and averaged. In other words, the influence of non pilot points is interpolated by surrounding pilot points in time domain. Simulation shows that the accuracy of the proposed algorithm is better than constant interpolation and linear interpolation, and slightly worse than DFT interpolation. Compared with the traditional channel estimation algorithm, the proposed algorithm improves the estimation accuracy, reduces the algorithm complexity, and shows great performance in the mean square error (MSE). At the same time, it has similar performance in different channels and better robustness, which can be applied.

Key words: narrowband Internet of Things; channel estimation; interpolation; inverse distance weight; weighted power exponent

1 概述

现今移动通信已经发展到了第五代移动通信技术(5th generation mobile networks, 5G),其中物联网(Internet of Things, IoT)是第五代移动通信技术实现万物互联的重要组成部分。低功耗广域网络(low-power wide-area network, LPWAN)是IoT中实现低功耗

和长距离通信的系统^[1]。LPWAN网络已经成为连接设备近三百亿的物联网市场中增长最快的领域之一,被认为具有很高价值的窄带物联网(Narrowband Internet of Things, NB-IoT)的出现满足了LPWAN市场的快速增长和发展的要求^[2]。采用授权频谱的NB-IoT是从现有的长期演进系统(long term evolution,

收稿日期:2020-10-16

修回日期:2021-02-25

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(61271334, 61073115)

作者简介:方承志(1976-),男,副教授,研究方向为模式识别、嵌入式系统和信号处理;李晨曦(1996-),男,硕士研究生,研究方向为信号处理。

LTE)中建立起来的窄带系统^[3],其重点为低数据速率,低功耗,降低甚至没有移动性^[4]。NB-IoT 系统需要很多技术的支撑。信息在传输过程中会被信道改变且不可控,采用的信道估计方法对整个系统的性能有很大的影响^[5]。良好的信道估计是 NB-IoT 系统中接收端准确恢复发送信息的关键技术部分。基于导频的信道估计,需要把一部分信号换成导频参考信号,用导频参考信号估计信道参数信息。虽然牺牲了利用率,但是复杂度大幅度下降。根据 NB-IoT 技术低复杂度,对时延不敏感的要求,综合其他要求,选择基于导频的信道估计。基于导频的信道估计^[6]插值过程中常用的插值算法有常数插值^[7]、线性插值^[8]和离散傅里叶 (discrete Fourier transform, DFT) 插值^[9-10]等。

常数插值算法是插值算法中最简单的一种插值算法,假设相邻两导频间的信道状态相同,即使用一个常数进行插值。线性插值假设相邻两个导频点的信息呈线性变化,只需知道相邻若干个导频点的信道响应。常数插值和线性插值虽然计算简单,但在导频间隔较大的情况下受噪声影响较大,无法及时跟踪信道,结果往往不准确。基于 DFT 的插值算法利用了信号处理中在时域补零等于在频域进行插值的原理来进行信道估计,另外这种算法还可以利用门限阈值对信道进行降噪处理,因为信号能量主要集中在前几个抽头上,其余抽头可以看作噪声去除。这种算法虽然极大地减小了噪声的影响,但需要对整个信道作 DFT,相较前两种算法,其算法复杂度有较大的增加。这些算法均存在精度和复杂度之间的问题,不适用于 NB-IoT 系统。

文中针对系统低功耗的特点,在算法复杂度较低的情况下较大地提升估计插值精度,提出改进的反距离权重插算法。该算法在时域方向上进行估计插值,在接近线性插值的复杂度要求的同时性能接近精度较高的 DFT 算法,均方误差 (mean-square error, MSE) 与误信率 (bit error ratio, BER) 显示 IDW 具有良好的性能。仿真结果表明,性能相较其他插值算法有较大提升,并可实现应用。

2 系统下行信道模型

根据 3GPP 协议^[11],NB-IoT 下行继承了 LTE 下行正交频分多址 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 技术的优势。OFDM^[12]通过频分复用实现高速串行数据的并行传输,具有频谱利用率高,有效抵抗存在的码间干扰和子信道间干扰的问题等特点。下行链路系统模型如图 1 所示。

发送设备发送比特流数据,经过编码调制变成有利于信道传输的调制信号,然后经过串并转换变成 N 路独立传输的子数据流,然后插入可以用于信道估计

的导频信号,这 N 路并行数据经过快速傅里叶反变换 (IFFT) 得到 N 路离散的信号,接着为了防止码间干扰,添加了循环前缀 (cyclic prefix, CP),最后经过数模转换及其他处理将信号发送出去。信号经过无线信道,接收端接到信号,经过一系列与发送方相反的处理,得到信号的频域形式,提取出插入的导频进行信道估计,再经过一系列处理得到发送方发送的数据。

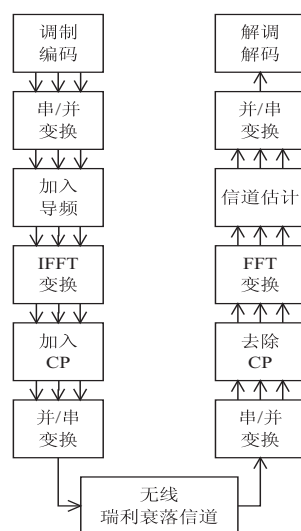


图 1 系统下行信道模型

3 信道估计算法

根据 3GPP 协议,NB-IoT 下行采用正交频分复用技术。OFDM^[12]通过复用实现高速串行数据的并行传输。NB-IoT 下行采用的基于导频的信道估计过程分为导频估计和信道插值两个部分。导频处估计使用较多的算法是最小二乘法 (least square, LS)、最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE) 算法和线性最小均方误差 (linear minimum mean square error, LMMSE) 算法^[13-14]。LS 算法是其他算法的基础,不能消除噪声干扰但不像 MMSE 和 LMMSE 算法需要矩阵运算,复杂度较低。经过带有噪声的瑞利衰落信道后信号可以表示为:

$$Y = HX + W \quad (1)$$

其中, Y 表示接受信号, H 表示信道的冲激响应即信道状态信息, X 表示发送信号, W 表示高斯噪声。LS 算法是现阶段最简单的一种算法,无需知道任何信道先验知识,原理是使接收信号与无高斯白噪声信号之差的平方的值最小。该算法的代价函数 $J(H)$ 为:

$$\begin{aligned} J(H) &= (Y - \hat{Y})^H (Y - \hat{Y}) = \\ &= (Y - X\hat{H})^H (Y - X\hat{H}) = \\ &= Y^H Y - Y^H X\hat{H} - \hat{H}^H X^H Y + \hat{H}^H X^H X\hat{H} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, \hat{Y} 表示估计出的导频处的接受信号, \hat{H} 表示估计出的导频处的信道状态信息,满足关系式:

$$\hat{Y} = X\hat{H} \quad (3)$$

根据 LS 算法,使代价函数最小化,即令上式关于的偏导等于零,这样就可以得到:

$$\frac{\partial J(\hat{H})}{\partial \hat{H}} = 0 \quad (4)$$

即得式(5):

$$\hat{H}_{LS} = (X^H X)^{-1} X^H Y = X^{-1} Y \quad (5)$$

求得式(5)即为导频处的冲激响应估计值。该算法的核心思想是使接收端与无高斯白噪声时的信号之差的平方最小化,通过使代价函数最小实现。估计出导频点处的信道状态信息后利用插值算法得出整个信道的状态信息,恢复发送信息。

3.1 传统的反距离权重插值算法

传统的 IDW 算法^[15]是最早应用在气象和地理等环境领域的平面二维插值算法。这些领域可以在实际中收集到平面散点图,无法测量的地区利用采样点进行插值计算。IDW 插值法^[14]是基于地理学定律相近相似的原理,是地球科学数据处理最流行的空间插值方法之一。该算法的基本思想为采样点对待估点都有一定的影响,且影响随距离的增大而减小。同时计算的采样点越少,运算速度越快。设一个平面上的采样点为 (x_i, y_i) , 该点的值 $Y(x_i, y_i)$ 记作 $Y_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。插值函数 $f(x, y)$ 为:

$$f(x) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i Y_i, & (x, y) \neq (x_i, y_i) \\ Y_i, & (x, y) = (x_i, y_i) \end{cases} \quad (6)$$

当 $(x, y) \neq (x_i, y_i)$ 即非采样点的估计值 $\hat{Y}(x, y)$ 为:

$$\hat{Y}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-p}} \quad (7)$$

式中, N 是参与计算采样点的数量,每个采样点的权值 λ_i 为:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-p}} \quad (8)$$

待测点 (x, y) 到采样点 (x_i, y_i) 的水平距离 d_i 为:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (9)$$

权重是关于距离的函数。另外大于 0 的常数 p 称为加权幂指数。当即为采样点时, $f(x, y) = Y_i$, 即该点的权重为 1, 采样点处的估计值等于它本身。

IDW 主要依赖于幂值 p 和采样点数量 N 。幂参数 p 可基于距输出点的距离来控制已知点对内插值的影响, p 值越大越强调近点。采样点数量 N 影响计算速度和准确度。容易看出,待估点处的估计值 $\hat{Y}(x, y)$

是 Y_1, Y_2, \dots, Y_N 的加权平均,是用分段表达式表示的,但它处处连续,可以得到式(10)、(11):

$$\lim_{\substack{x \rightarrow x_i \\ y \rightarrow y_i}} f(x, y) = \lim_{\substack{x \rightarrow x_i \\ y \rightarrow y_i}} \frac{\sum_{i=1}^N d_i^{-p} Y_i}{\sum_{i=1}^N d_i^{-p}} = Y_i \quad (10)$$

$$Y_i = f(x_i, y_i) \quad (11)$$

即 IDW 插值函数 $f(x, y)$ 在任意插值点处连续。系统的信道状态信息和 IDW 算法都是连续的,这为算法的应用提供了可行性。

3.2 改进的反重插值算法

二维时频信道估计在散装导频分布时效果较为明显。传统的 IDW 算法应用在格型导频时性能可以得到较大的提升,但增加了算法复杂度,不适应 NB-IoT 系统。根据块状导频分布^[16]的特点,使用时域插值,使用一维的改进的 IDW 算法在时域方向上进行插值,计算复杂度得到简化的同时,通过实验仿真得到性能依然优于现阶段使用的大部分算法。

简化后的一维改进的 IDW 算法变为仅在时域上计算的一维内插算法。设待估点为 x , 该点的值为 $\hat{Y}(x)$, 简记为 \hat{Y} , 已知导频点为 x_i , 该点值为 $Y(x_i)$, 简记为 Y_i 。由于导频点不需要更新,仅估计数据点,当 $x \neq x_i$ 时,插值函数 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Y(x_i) \quad (12)$$

该点的估计值 \hat{Y} 即为:

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^N \lambda_i Y_i \quad (13)$$

式中, N 同样为参与计算的导频点的数量,每个导频点处的权重 λ_i 为:

$$\lambda_i = \frac{d_i^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-p}} \quad (14)$$

每个导频点处的权重 d_i 为:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2} \quad (15)$$

其中, d_i 为待估点 x 与每个已知导频点 x_i 之间的水平距离。 $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$ 保证了导频点对插值结果作用的权重之和为 1。同传统的 IDW 算法,插值函数在一维时域方向上连续,具有可行性。改进的 IDW 属于精确插值方法,不需要矩阵运算,仅需要前后若干个导频点直接计算得出,复杂度较低。

4 仿真实验与结果分析

4.1 实验过程

接收端收到信号后,进行以下步骤:

(1) 计算出导频位置,提取出导频信号后根据发

端导频信号利用 LS 导频估计算法得到导频处的信道状态信息;

(2) 在每个子载波上, 计算出数据点的位置, 根据改进的 IDW 算法, 使用不同插值算法和改进的 IDW 算法中不同幂指数和参与计算导频点的数量来测试改进的 IDW 算法与其他插值算法的性能并找出最佳算法参数;

(3) 设置不同多径数和不同最大时延的瑞利衰落信道, 使用改进的 IDW 算法插值在不同的信道状态信息中的性能。

4.2 结果分析

理论上参与计算点的数目 N 值越大即联系的点越多, 计算精度越高。结合导频的分布, 根据计算得到当 $p=2$, $N=6$ 时, 靠近导频的数据点最远处两侧的导频点权重均小于 0.01, 影响较小, 可忽略不计。

NB-IoT 下行信道资源分布如图 2 所示。

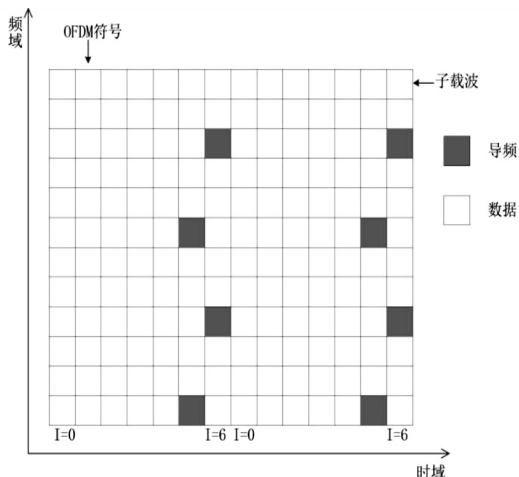


图 2 单天线端口下行信道资源分布

根据导频分布情况, 导频分布仅在每帧的最后两个符号, 近似呈块状, 适用于频率选择性的慢衰落信道和信道估计, 使用时域方向上的信道估计较为合适。

使用 MATLAB 对上述四种插值算法进行实验仿真。为了减小算法复杂度, 频域方向上使用常数插值, 无导频的子载波使用距离下方最近的具有导频的子载波的信道状态信息, 导频处估计使用 LS 算法。假设收发端严格同步。根据 NB-IoT 系统的要求, 子载波个数为 96, 每个子载波上有 70 个 OFDM 符号, 每帧有 7 个 OFDM 符号, 保护间隔设计为子载波长度四分之一长度的 CP。导频的图案使用图 2 所示的插入方式。所有仿真均采用误比特率 (bit error rate, BER) 来衡量整个算法的性能。所有过程均循环 50 次并取均值作为结果。

4.2.1 反距离权重插值与其他算法误信率

$p=0.5$ 与 $p=2$ 时改进的 IDW 插值与常数插值, 线性插值和 DFT 插值算法的 BER 比较如图 3 所示。

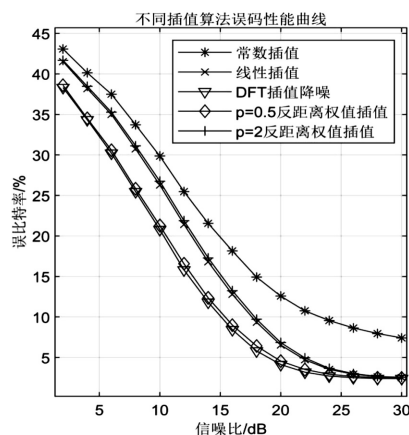


图 3 不同插值算法下误码率的比较

由图 3 可知, 对比这五种算法, 性能从优到劣依次是 $p=0.5$ 时改进的 IDW, 线性插值, $p=2$ 时改进的 IDW, 常数插值。在实际应用中, 常数插值算法虽然最简单, 但性能最差。DFT 算法虽然准确率最高, 但计算量最大, 都不符合系统的要求。改进的 IDW 插值算法与线性插值算法和 DFT 插值相比, 当 $p=2$ 时, 准确率低于线性插值, 但当 $p=0.5$ 时, 准确率较线性插值有 3% 误比特率的提升, 计算量与线性插值相当, 同时较 DFT 算法有小于 1% 误比特率的下降, 但计算量远小于 DFT 算法。综合准确率和复杂度, $p=0.5$ 时改进的 IDW 最适用于此 NB-IoT 系统。

4.2.2 反距离权重插值与其他算法的均方误差

$p=0.5$ 与 $p=2$ 时改进的 IDW 插值与常数插值, 线性插值和 DFT 插值算法的 MSE 比较如图 4 所示。

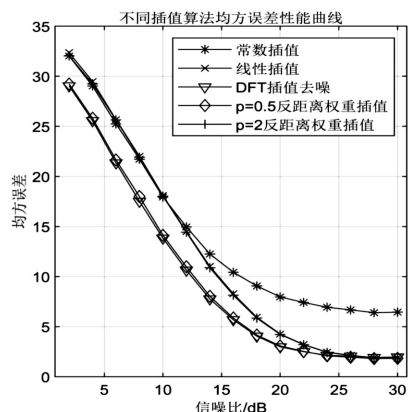


图 4 不同插值算法下均方误差的比较

由图 4 可知, 这五种插值算法的 MSE 与 BER 的结果相一致, $p=0.5$ 的改进的 IDW 插值算法性能优于其他算法。改进的 IDW 算法 $p=0.5$ 时的均方误差优于 DFT 的插值算法, 在高信噪比和低信噪比的环境中均保持着较为稳定的性能。

4.2.3 反距离权重插值的鲁棒性分析

根据 IoT 中信道的分类, 在低速甚至是无移动性的使用环境下, 分别使用多普勒频移为 0 Hz 的三径瑞

利衰落信道,多普勒频移为 0 Hz 的六径瑞利衰落信道,多普勒频移为 5 Hz 的三径瑞利衰落信道,多普勒频移为 5 Hz 的六径瑞利衰落信道这四种信道来比较改进的 IDW 在不同环境下的性能,测试改进的 IDW 的鲁棒性。改进的 IDW 算法在不同信道中的结果如图 5 所示。

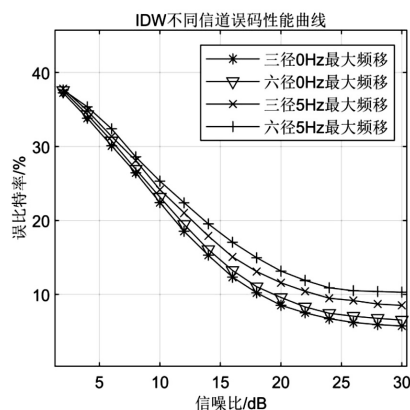


图 5 不同信道下的 IDW 性能

由图 5 可知,性能最优的为多普勒频移为 0 Hz 的三径瑞利衰落信道,最劣为多普勒频移为 5 Hz 的六径瑞利衰落信道。虽然在仿真的理想环境下在不同多径的环境下有大约 1% 误码率的差别,在不同最大多普勒频移的环境下有大约 2% 误比特率的差别,但是在实际应用中是可以忽略的。综上所述,IDW 插值算法在不同信道下都有着良好的性能,因此鲁棒性较好,可以适用于实际中的情况。

4.3 算法复杂度比较

由上述的四种插值方法可算得,常数插值,线性插值和 IDW 的算法复杂度的等级为 $O(N)$,而 DFT 算法的等级为 $O(N \log_2 N)$,相比较之下 DFT 最复杂。在复杂度方面,常数插值,线性插值和 IDW 插值为同等级别。因为 NB-IoT 的设备电源的使用需要达到十年左右的要求,算法复杂度与功耗有密不可分的联系,所以 IDW 最符合 NB-IoT 的设计要求。

5 结束语

文中对 NB-IoT 下行信道信道估计算法进行了研究,提出一种改进的 IDW 的插值算法。针对系统低功耗的特点,改进用于时频二维 IDW 插值算法,变成仅在时域方向进行插值的一维 IDW 算法,同时提出了相应的加权幂指数和计算点数。理论与仿真结果表明,与其他算法相比,提出的改进 IDW 插值算法提高了估计精度和鲁棒性,并降低了算法复杂度。

参考文献:

[1] MEKKI K,BAJIC E,CHAXEL F,et al. Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment; Sigfox,

LoRaWAN, and NB-IoT [C]//Pervasive computing and communications. [s. l.]:IEEE,2018:197-202.

- [2] MIGABO E M,DJOUANI K D,KURIEN A M. The narrow-band internet of things (NB-IoT) resources management performance state of art, challenges, and opportunities [J]. IEEE Access,2020,8:97658-97675.
- [3] RATASUK R,VEJLGAARD B,MANGALVEDHE N,et al. NB-IoT system for M2M communication [C]//Wireless communications and networking conference. Doha, Qatar: IEEE,2016:1-5.
- [4] ANDRESMALDONADO P, AMEIGEIRAS P, PRADOSGARZON J,et al. An analytical performance evaluation framework for NB-IoT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019,6(4):7232-7240.
- [5] KAUR H,KHOSLA M,SARIN R K. Channel estimation in MIMO-OFDM system;a review [C]//2018 second international conference on electronics, communication and aerospace technology (ICECA). [s. l.]:IEEE,2018:974-980.
- [6] 李姣军,张亭亭,黄明敏,等. 一种改进的 LS 信道估计算法 [J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2018,32(12):170-174.
- [7] 汪婷. 隧道环境中 OFDM 信道估计算法研究 [D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [8] 方承志,程宥铖,火兴龙. 基于 MLS 的 NB-IoT 系统下行信道估计算法 [J]. 计算机工程,2020,46(2):183-186.
- [9] 刘顺兰,汪佳丽. 改进的基于 DFT 的 OFDM 系统信道估计算法 [J]. 计算机工程与应用,2016,52(19):117-121.
- [10] ZHANG Y,LIU K. A DFT-based channel estimation algorithm with noise elimination for burst OFDM systems [C]//2019 6th international conference on information science and control engineering (ICISCE). [s. l.]:IEEE,2019:28-31.
- [11] Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation, V15.6.0; 3GPP TS 36.211 [S]. 2019.
- [12] 姜洁,仲伟志. MIMO-OFDM 系统的时域信道估计 [J]. 计算机技术与发展,2015,25(05):138-142.
- [13] XIN R,NI Z,WU S,et al. Low-complexity joint channel estimation and symbol detection for OFDMA systems [J]. China Communications,2019,16(7):49-60.
- [14] AGARKAR P T,NAROLE N G,HAJARE P R,et al. A novel LS-LMMSE channel parameter tuning approach using particle swarm optimization in MIMO-OFDM [C]//2018 international conference on current trends towards converging technologies (ICCTCT). Coimbatore, India: IEEE,2018:1-6.
- [15] 易桂花,张廷斌,何奕莹,等. 四种气温空间插值方法适用性分析 [J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2020,47(1):115-128.
- [16] 李翔宇,李 璵,包艳英,等. 基于反距离加权插值法评价海域水质类别空间分布 [J]. 中国环境监测,2019,35(6):70-77.