



基于 MLS 的 NB-IoT 系统下行信道估计算法

方承志,程宥铖,火兴龙

(南京邮电大学 电子与光学工程学院 微电子学院,南京 210003)

摘 要: 窄带物联网(NB-IoT)是 3GPP 针对低功耗、广覆盖类业务定义的新一代蜂窝物联网技术,是实现万物互联的重要技术之一,而信道估计则是 NB-IoT 终端能否准确恢复发射信号的基础。通过对 NB-IoT 中基于导频的下行信道估计算法进行研究,提出基于移动最小二乘法(MLS)的信道插值估计算法。在发射端插入导频信号,根据接收端的信号计算导频点信道参数,并引入紧支的概念,利用附近子域对导频点的影响权重估计信道参数。仿真结果表明,与线性插值和二次插值算法相比,采用该算法进行信道估计系统误码率较低,并且算法的计算复杂度也未显著增加。

关键词: 窄带物联网;移动最小二乘法;紧支;信道估计;导频

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



中文引用格式: 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.

英文引用格式: FANG Chengzhi, CHENG Youcheng, HUO Xinglong. Downlink channel estimation algorithm of NB-IoT system based on MLS[J]. Computer Engineering, 2020, 46(2): 183-186.

Downlink Channel Estimation Algorithm of NB-IoT System Based on MLS

FANG Chengzhi, CHENG Youcheng, HUO Xinglong

(College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

【Abstract】 The Narrow Band Internet of Things (NB-IoT), as a new generation of cellular IoT technology defined by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) for low-power and wide-coverage services, is one of the key technologies for achieving the Internet of Everything. Channel estimation technique is the key to whether the NB-IoT terminal can accurately and effectively recover the transmitted signal. This paper conducts a study on the pilot-based downlink channel estimation algorithm in NB-IoT, and proposes a channel interpolation estimation algorithm based on Movable Least Squares (MLS). The pilot is inserted in the transmitting terminal, and the pilot point channel parameters are calculated according to the signals in the receiving terminal. After that, the concept of compact support is introduced, and the channel parameters are estimated by using the nearby sub-domains to influence the weight of the pilot points. Simulation results show that compared with the traditional linear interpolation and quadratic interpolation algorithms, the bit error rate of the proposed algorithm is lower while the computational complexity is not significantly increased.

【Key words】 Narrow Band Internet of Things (NB-IoT); Movable Least Squares (MLS); compact support; channel estimation; pilot

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0054246

0 概述

窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)^[1]是 3GPP Release 13 中引入的新型蜂窝技术,是低功耗广域(Low Power Wide Area, LPWA)覆盖技术之一,是 5G 系统的组成部分,主要应用于极端覆盖环境下运行的超低端物联网设备^[3]。相较于其他 LPWA 技术, NB-IoT 具有覆盖广、连接多、速率

低、成本低、功耗低、架构优等优点^[4]。由于 NB-IoT 存在大量的市场需求并具备良好的通信网络支撑,因此拥有广阔的发展前景^[5]。

信道估计是实现 NB-IoT 的基础技术之一^[6],有效的信道估计是接收机提高覆盖、均衡和信号解码的前提^[7]。NB-IoT 下行链路采用正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技术^[8],其信道估计采用基于参考信号的信道估计

基金项目:国家自然科学基金(61271334, 61073115)。

作者简介:方承志(1976—),男,副教授、博士,主研方向为信号处理、模式识别、嵌入式系统;程宥铖、火兴龙,硕士研究生。

收稿日期:2019-03-15 修回日期:2019-04-18 E-mail:18305169260@163.com

方法。传统信道估计采用插值法如线性插值^[9]和二次插值^[10]算法,虽然简单方便但精度不高,而且插值结果误差较大。

本文提出一种基于移动最小二乘法的 NB-IoT 信道估计算法。在导频辅助的 NB-IoT 下行链路系统模型中,通过导频技术计算各个导频点信道参数,并将其看作一个二维平面,采用移动最小二乘法^[11-12]进行插值拟合,得到各数据点的信道响应,利用接收数据恢复发送信号。

1 NB-IoT 下行链路模型

基于导频辅助的 NB-IoT 下行链路系统模型如图 1 所示。

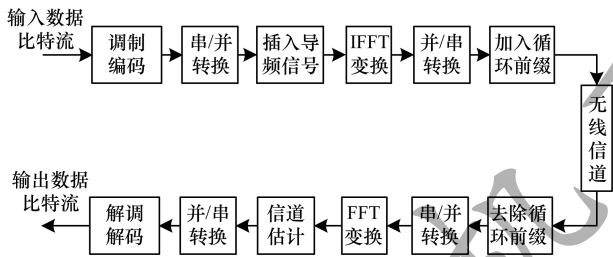


图 1 NB-IoT 下行链路系统模型
Fig.1 System model of NB-IoT downlink

NB-IoT 下行链路采用的是 OFDMA 技术:

- 1) 发射端将数据比特流经过调制编码和串/并转换生成 N 个独立的子数据流。
- 2) 插入导频参考信号,将这 N 路并行数据进行快速傅里叶逆变换 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) 后得到 N 路时域离散信号,再经并/串转换成 1 个数据流。
- 3) 在数据流中插入循环前缀,将其经数模转换以及射频模块处理后发射。
- 4) 通过无线多径信道, NB-IoT 下行接收到信号后,经过去除循环前缀、串/并转换、FFT、信道估计、并/串转换、解调制解码得到原始比特流信号。

设发送信号为 X ,接收端理想同步,则 OFDM 解调后终端的接收信号 Y 为:

$$Y = X \cdot H + N \quad (1)$$

其中, H 为信道频域响应, N 为加性高斯白噪声。

根据 3GPP 协议中关于 NB-IoT 标准的规定^[13], NB-IoT 下行导频参考信号在窄带下行物理共享信道 (NPDSCH) 的子帧中发送,一个天线端口传输的下行导频参考信号在资源块上的分配模式如图 2 所示。由图 2 可知,同一个子载波两相邻的参考信号 (R) 在时域上的间隔为 7 个 OFDM 符号,而在同一 OFDM 符号上的两相邻的参考信号间隔为 6 个子载波。携带参考信号的不同子载波的时域间隔为 1 个或者 6 个 OFDM 符号,频域间隔则为 3 个子载波。

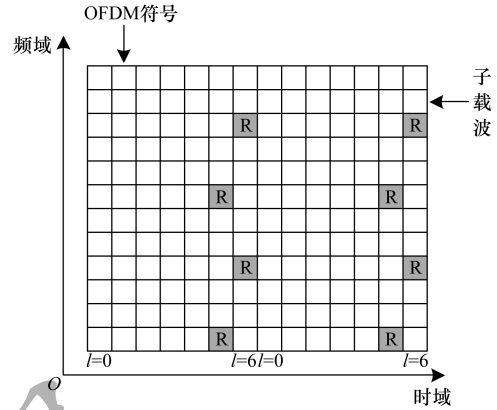


图 2 3GPP NB-IoT 单天线端口传输的下行参考信号在资源块中的分布示意图

Fig.2 Distribution schematic diagram of downlink reference signal transmitted by 3GPP NB-IoT single antenna port in resource block

2 NB-IoT 下行链路信道插值算法及其改进

导频子载波处信道估计一般采用最小二乘 (Least Squares, LS) 算法^[14]和最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 算法^[15]。考虑到 NB-IoT 系统的终端一般为超低端物联网设备,其复杂度和功耗都较低,本文采用实现复杂度低的 LS 算法。

2.1 LS 信道估计算法

LS 算法是基于导频信道估计算法中最简单的一个算法,也是其他算法如 MMSE、LMMSE^[16]的基础。该算法在忽略无线传输信道噪声的影响下,求得一个信道响应 H ,使得接收端的信号 Y 与发射端信号 X 的误差平方函数 $J(H)$ 最小。

$$J(H) = \|Y - XH\|^2 = (Y - XH)^H (Y - XH) \quad (2)$$

对函数 $J(H)$ 关于 H 求偏导,令其等于 0,得到 LS 的信道估计响应 H_{LS} 为:

$$H_{LS} = (X^H X)^{-1} \cdot X^H Y = X^{-1} Y \quad (3)$$

将式(1)代入式(3),有:

$$H_{LS} = H + X^{-1} N \quad (4)$$

2.2 插值法

在估计出导频点处的信道函数后,再对其用插值算法得出整个数据子载波处的信道函数。目前普遍采用的插值算法有线性插值、二阶插值等。

1) 线性插值

线性插值法是利用相邻的 2 个导频点的信道响应值估计出中间数据的信道响应。由于线性插值只利用了相邻 2 个导频点,因此实现简单、计算量小。然而 NB-IoT 下行参考信号导频间隔较大且导频分布较分散,无线信道变化剧烈,噪声的影响较大,在某些情况下线性插值估计的数据点信道响应误差可能非常大^[17]。

2) 二阶插值

二阶插值法又称抛物插值算法,是利用前后相邻的 3 个导频点的信道估计响应来估计数据子载波

处信道响应。相较于线性插值,二阶插值由于利用更多的导频信号,其精确度有所提高,运算复杂度也随之增加^[18],但对NB-IoT下行参考信号导频分布的估计误差仍较大。

3) 移动最小二乘法插值

移动最小二乘(Moving Least Squares, MLS)插值算法引入紧支的概念,即第 x 个数据子载波处信道响应只受 x 附近子域(x 的影响区域)内所有导频点信道估计响应的影响,子域外导频点对 x 的信道响应没有影响。由于每个导频点对 x 处的信道响应的影响权重不同,因此本文用一个权函数来计算每个导频点的影响。通过系数向量和基函数来求 x 处的信道响应估计值:

$$\hat{H}(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i(x) p_i(x) = (\mathbf{p}(x))^T \boldsymbol{\alpha}(x) \quad (5)$$

基函数向量为:

$$\mathbf{p}(x) = [p_1(x), p_2(x), \dots, p_m(x)]^T \quad (6)$$

其中, m 为基函数个数,常用的基函数为线性基函数。令 x 的附近子域的半径为 s_{\max} :

(1) 一维情况: $\mathbf{p}(x) = (1, x)^T, m=2$ 。此时只使用数据点 x 子域的同子载波上参考信号点。

(2) 二维情况: $\mathbf{p}(x) = (1, x, y)^T, m=3$ 。此时使用数据点 x 二维时频面上子域内所有参考信号点。由于使用更多的参考信号点能更好地抵消噪声对信号的影响,因此其对信道的频率响应估计更加准确。但是无线信道的变化比较剧烈,所以子域半径选择也不能过大。

系数 $\boldsymbol{\alpha}(x) = [\alpha_1(x), \alpha_2(x), \dots, \alpha_m(x)]^T$ 可以通过求式(7)的极小值得到。

$$J = \sum_{i=1}^n \mathbf{w}(s) [(\mathbf{p}(x_i))^T \boldsymbol{\alpha}(x) - H_p(i)]^2 \quad (7)$$

其中, $s = |x - x_i|_2, n$ 为子域的所有导频点数, $\mathbf{w}(s)$ 为 x_i 的权函数。常用的权函数有指数函数、锥形函数、三角函数、高斯函数和样条函数等,本文采用样条函数^[19]。令 $\bar{s} = \frac{s}{s_{\max}}$,对式(7)关于 $\boldsymbol{\alpha}(x)$ 求极值得:

$$\boldsymbol{\alpha}(x) = (\mathbf{A}(x))^{-1} \mathbf{B}(x) \mathbf{H}_p \quad (8)$$

$$\mathbf{A}(x) = \sum_{i=1}^n \mathbf{p}(x_i) \mathbf{w}(x - x_i) (\mathbf{p}(x_i))^T$$

$$\mathbf{B}(x) = [\mathbf{w}(x_1) \mathbf{p}(x_1), \mathbf{w}(x_2) \mathbf{p}(x_2), \dots, \mathbf{w}(x_n) \mathbf{p}(x_n)]$$

$$\mathbf{H}_p = [H_p(1), H_p(2), \dots, H_p(n)]^T$$

代入式(5)有:

$$\hat{H}(x) = \sum_{i=1}^n \phi_i^k(x) H_p(i) = \boldsymbol{\psi}^k(x) \mathbf{H}_p \quad (9)$$

其中, $\boldsymbol{\psi}^k(x) = [\phi_1^k, \phi_2^k, \dots, \phi_n^k] = (\mathbf{p}(x))^T (\mathbf{A}(x))^{-1}$, $\mathbf{B}(x)$ 为形函数, k 为基函数的阶数。

移动最小二乘法利用了数据点附近子域所有的导频信号,采用权函数来计算每个导频点的影响值,虽然提高了算法的计算复杂度,但相比其数据点信道响应的估计准确性的大幅提升,增加的复杂度完全是可以接受的。

2.3 算法复杂度比较

由于加法运算相对于乘法运算的复杂度几乎可以忽略,因此本文只考虑各插值算法的乘法运算次数。设系统的数据子载波为 N ,导频参考信号个数为 P ,则线性插值算法的复杂度为 $O(4N)$,二次插值算法的复杂度为 $O(12N)$,一维MLS插值算法的复杂度为 $O((14+2P)N)$,二维MLS插值算法的复杂度为 $O((60+3P)N)$ 。可以看出,4种算法的复杂度等级都为 $O(N)$,没有数量级的变化。

3 仿真与结果分析

本文使用MATLAB平台对上述插值算法进行仿真。实验采用多径瑞利信道模型^[20],设置发射端和接收端严格同步,调制方式选用16QAM,系统带宽为180 kHz,子载波间隔为15 kHz,子载波个数为96,每个载波上有60个OFDM符号,保护间隔长度为24。采用NB-IoT单天线端口传输的下行参考信号在资源块中导频插入,导频间隔为6,经各插值算法估算的误码率对比情况如图3所示。

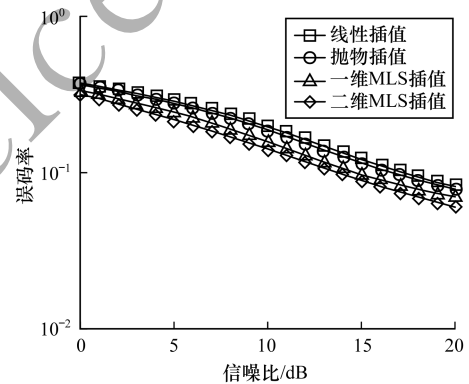


图3 各插值算法估算的误码率对比

Fig. 3 Comparison of bit error rates estimated by interpolation algorithms

从图3可以看出,移动最小二乘插值算法在一维和二维估计情况下的误码率都明显小于传统的线性插值和二次插值算法,在误码率相同的情况下,二维移动最小二乘插值算法的信噪比比线性插值小4 dB以上,而在误码率相同的情况下,一维MLS插值算法的信噪比与二维MLS插值算法相差在1 dB以内,但其计算复杂度更低。因此,采用一维MLS插值算法即可有效解决传统信道估计插值算法插值误差较大导致的估计精度低的问题。

4 结束语

NB-IoT 系统中信道估计插值结果的准确性直接影响终端设备性能。本文在 NB-IoT 下行链路模型的基础上,针对终端设备复杂度低、发送数据量少等特点,提出一种基于移动最小二乘法的插值估计算法。仿真结果表明,与线性插值和二次插值算法相比,该算法在未大幅增加计算复杂度的情况下,有效提高了系统信道估计的准确度。后续将动态地选取更契合实时 NB-IoT 信道特性的基函数与权函数,进一步提升系统信道估计性能。

参考文献

- [1] RICO-ALVARINO A, VAJAPEYAM M, XU H, et al. An overview of 3GPP enhancements on machine to machine communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(6): 14-21.
- [2] SINHA R S, WEI Y, HWANG S H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT [J]. ICT Express, 2017, 3(1): 14-21.
- [3] NARAYANAN S, TSOLKAS D, PASSAS N, et al. NB-IoT: a candidate technology for massive IoT in the 5G era [C]// Proceedings of 2018 IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [4] ZHANG L, IJAZ A, XIAO P, et al. Channel equalization and interference analysis for uplink narrowband Internet of Things [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(10): 2206-2209.
- [5] CENTENARO M, VANGELISTA L, ZANELLA A, et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(5): 60-67.
- [6] RUSEK F, HU S. Sequential channel estimation in the presence of random phase noise in NB-IoT systems [C]// Proceedings of the 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [7] ZHANG Haoyan. Research on channel estimation based on 3GPP LTE downlink baseband system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
张皓彦. 基于 3GPP LTE 下行链路基带系统信道估计的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [8] CHEN Min, MIAO Yiming, HAO Yixue, et al. Narrow band Internet of Things [J]. IEEE Access, 2017, 5: 20557-20577.
- [9] ZHANG Jing, ZHANG Hongbo, DENG Mingliang, et al. Channel estimation based on linear interpolation algorithm in DDO-OFDM system [C]// Proceedings of Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition. Washington D. C., USA: Optical Society of America, 2010: 798-810.
- [10] LIU Xinying. Research on channel estimation and detection in IEEE802. 11 standard [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
刘新营. IEEE802. 11 标准的信道估计与检测技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [11] LIU Jun. Research on curve fitting and interpolation of movable least squares scatter curves [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
刘俊. 移动最小二乘散点曲线曲面拟合与插值的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [12] ZHONG Xijian, ZHANG Gengxin, XIE Zhidong. Construction of antenna gain model based on movable least square [J]. Communications Technology, 2016, 49(5): 549-553. (in Chinese)
钟锡健, 张更新, 谢智东. 基于移动最小二乘法的天线增益模型构建 [J]. 通信技术, 2016, 49(5): 549-553.
- [13] 3GPP. Physical channels and modulation: 3GPP TS 36. 211 [S]. 3rd Generation Partnership Project, 2016.
- [14] KETONEN J, JUNTTI M, YLIOINAS J, et al. Implementation of LS, MMSE and SAGE channel estimators for mobile MIMO-OFDM [C]// Proceedings of the 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 1092-1096.
- [15] SAVAUX V, DJOKO-KOUAM M, LOU Y, et al. Effect of polynomial interpolations on the estimation performance of a frequency-selective Rayleigh channel in orthogonal frequency division multiplexing systems [J]. IET Signal Processing, 2015, 9(1): 97-109.
- [16] KHLIFI A, BOUALLEGUE R. An accurate and very low complexity LMMSE channel estimation technique for OFDM systems [J]. Wireless Personal Communications, 2016, 88(4): 911-922.
- [17] LI Wenting. The research of pilot-based channel estimation in LTE system [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)
李文婷. LTE 系统基于导频的信道估计技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [18] HE Jiang. Research and implementation of channel estimation in OFDM system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
何江. OFDM 系统的信道估计研究与实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [19] LIU Huayong, XIE Xinpeng, LI Lu, et al. Integration and application of UQT-spline curves and surfaces [J]. Computer Engineering, 2016, 42(2): 236-241, 248. (in Chinese)
刘华勇, 谢新平, 李璐, 等. UQT-样条曲线曲面的融合及其应用 [J]. 计算机工程, 2016, 42(2): 236-241, 248.
- [20] ZHANG Tianqi, WANG yu'e, BAO Rui, et al. Blind recognition of OFDM signals in multi-path fading channels [J]. Journal of Beijing University of Posts and telecommunications, 2012, 35(3): 74-78. (in Chinese)
张天骐, 王玉娥, 包锐, 等. 多径衰落信道下 OFDM 信号盲识别 [J]. 北京邮电大学学报, 2012, 35(3): 74-78.

编辑 刘盛龄