

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.004

引用格式:吴虹,王冲,刘兵,等.一种改进的 GFDM 时频同步算法[J].电讯技术,2016,56(12):1322-1326. [WU Hong, WANG Chong, LIU Bing, et al. An improved timing and frequency synchronization algorithm for generalized frequency division multiplexing systems[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12):1322-1326.]

一种改进的 GFDM 时频同步算法*

吴 虹^{**1,2}, 王 冲^{1,2}, 刘 兵^{1,2}, 穆巍炜^{1,2}, 徐锡燕^{1,2}, 马肖旭^{1,2}, 李欣然^{1,2}

(1. 南开大学 电子信息与光学工程学院, 天津 300071; 2. 天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300071)

摘 要:针对广义频分复用(GFDM)系统对符号定时同步要求较高的问题,提出了一种新的基于前缀码的同步算法。在接收端,在获取粗略定时信息的基础上,利用前缀码前后两部分的相位差实现载波频偏估计,并对接收序列的频率偏移进行纠正,然后通过纠正后序列与已知发射前缀的互相关函数实现精确的符号定时估计。由于该前缀码具有共轭对称的特性,使其避免了“平顶效应”的出现。结合 5G 中低时延高可靠场景,在频率选择性信道中对其进行仿真,并通过均方误差对其性能进行了评估。理论分析及仿真结果表明,该算法相对于原算法具有更好的定时同步性能和更低的复杂度,提升了 GFDM 系统的整体性能。

关键词:广义频分复用;定时偏移;载波频偏;同步算法

中图分类号:TN919.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)12-1322-05

An Improved Timing and Frequency Synchronization Algorithm for Generalized Frequency Division Multiplexing Systems

WU Hong^{1,2}, WANG Chong^{1,2}, LIU Bing^{1,2}, MU Weiwei^{1,2}, XU Xiyun^{1,2}, MA Xiaoxu^{1,2}, LI Xinran^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Tianjin 300071, China)

Abstract: According to the higher requirements of generalized frequency division multiplexing (GFDM) system for symbol timing synchronization, a synchronization algorithm is proposed based on a new preamble. At the receiver, after obtaining the coarse timing synchronization, the carrier frequency offset is estimated through the phase difference between the two halves of the preamble. Then the carrier frequency offset in the received signal is corrected. And a more accurate estimation of symbol timing offset is obtained by the cross-correlation with the transmitted preamble. Due to the conjugate symmetry characteristic of the preamble, this algorithm can avoid the plateau effect. In the low-latency high-reliability scenario of 5G, simulations are done in frequency-selective channels, and the performance of the scheme is evaluated in terms of mean squared error (MSE) of the frequency and time offset estimation. Theoretical analysis and simulation results show that the new algorithm has a better timing synchronization performance and can reduce the complexity of the system, thus enhancing the overall performance of system.

Key words: generalized frequency division multiplexing (GFDM); timing offset; carrier frequency offset; synchronization algorithm

* 收稿日期:2016-05-18;修回日期:2016-07-11 Received date:2016-05-18;Revised date:2016-07-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61571244)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61571244)

** 通信作者:wuhong@nankai.edu.cn **Corresponding author:** wuhong@nankai.edu.cn

1 引言

随着第五代移动通信(The Fifth Generation Mobile Communication System, 5G)逐渐成为全球移动通信领域研究的热点,5G 愿景与关键能力需求已基本明确。低时延高可靠场景是 5G 新拓展的场景,主要面向物联网业务,为用户提供可靠的网络连接、低的接入延迟及更好的移动支持性。文献[1]介绍了几种新的多载波调制方式,更好地满足下一代移动通信的需求。广义频分复用(Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)^[2-3]是由德国 5G 非正交波束复形(5G Non-Orthogonal Waveforms for Asynchronous Signalling, 5G NOW)项目于 2009 年提出的一种多载波调制方案,由于其具有低时延、低带外辐射等优点,并在频率选择性衰落信道中具有良好的性能^[4],因此将成为未来 5G 新场景需求的一个非常灵活的解决办法。

多载波通信系统的一个重要问题即同步问题^[5]。文献[6]对 GFDM 在存在符号定时偏移(Symbol Timing Offset, STO)及载波频率偏移(Carrier Frequency Offset, CFO)情况下的性能进行了分析,表明 GFDM 系统对于定时偏移比正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)更为敏感,因此,必须对其进行非常精确的符号定时同步。与 OFDM 众多的同步技术^[7]相比,目前 GFDM 的同步方法非常少,其主要方法可分为基于数据辅助型及非基于数据辅助型两种。文献[8]介绍了一种非基于数据辅助的同步算法,在非常严重的多径条件下,为 GFDM 系统提供了一种粗略频偏估计的方法。基于数据辅助型算法主要是通过增加训练序列,并利用训练序列的相关性来实现 GFDM 的时频同步^[9-11],该类算法估计精度更高,应用更广。文献[9]介绍了一种基于前缀码的时频同步算法,但其实现过程中会出现“平顶效应”。

本文提出了一种改进的同步算法,实现了 GFDM 系统中符号定时及载波频偏的准确估计,并验证了其在频率选择性衰落信道中的性能。

2 GFDM 的基本模型

GFDM 是 5G NOW 项目组针对下一代移动通信提出的一种新的物理层方案。与 OFDM 使用矩形脉冲滤波器不同,GFDM 是一种采用非矩形脉冲成型的多载波调制系统,其发送端的系统模型如图 1 所示。

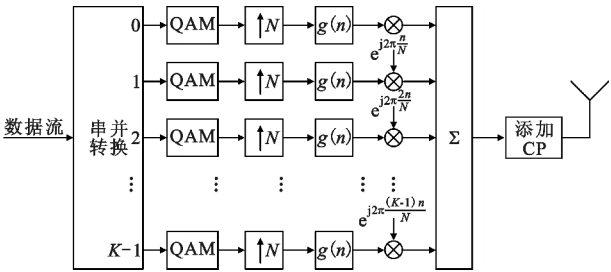


图 1 GFDM 系统发送端框图
Fig. 1 Block diagram of the GFDM transmitter

首先将发送数据流进行串并转换,形成 K 路并行数据,每路数据携带 M 个子符号,形成总计 MK 路并行数据流,经过正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)映射变为复值数据符号 $d_k[m]$;然后,将其经过 N 倍升采样,与时域延时 mN 的成型脉冲 $g(n-mN)$ 做循环卷积;再将各路信号分别调制到其子载波中心频率 $e^{j2\pi \frac{kn}{N}}$ 上;最后,将 K 路并行数据进行并串转换,并在每路数据前添加循环前缀(Cyclic Prefix, CP),可以得到其发送信号为

$$x[n] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} d_k[m] \tilde{g}_{T_s}[n-mN] e^{j2\pi \frac{kn}{N}}. \quad (1)$$

式中: K 为子载波数,一般取 2 的 n 次幂; M 为子符号数,一般小于 10; $d_k[m]$ 为复值数据符号,表示在第 k 个子载波上第 m 个时隙传输的数据分组; $\tilde{g}_{T_s}[n]$ 是子载波滤波器; $\tilde{g}_{T_s}$ 为子载波滤波器 $g_{T_s}[n]$ 的时域循环。在发送端需要传送的数据信息可以用矩阵 $\mathbf{d} = [d_0^T, d_1^T, \dots, d_{K-1}^T]^T$ 表示,其中 $\mathbf{d}_k = [d_k[0], d_k[1], \dots, d_k[M-1]]^T$ 为第 k 个子载波上传输的符号。GFDM 数据块结构如图 2 所示。

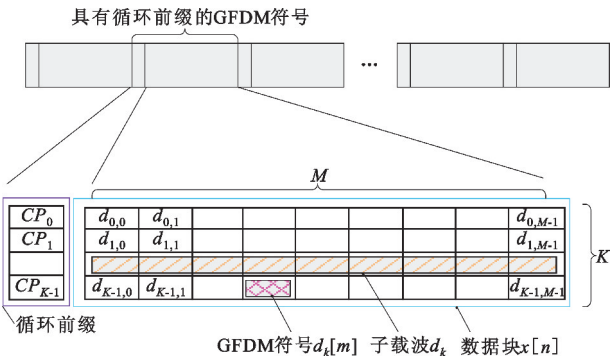


图 2 GFDM 数据块结构
Fig. 2 Structure of the GFDM data block

定义 T_0 为每个子符号周期, T_{CP} 为循环前缀的周期,整个 GFDM 的符号周期 $T_{GFDM} = T_{CP} + MT_0$,可以看出由于 GFDM 的数据块结构,使其相对 OFDM 使用更少的 CP,具有更高的频谱效率。

3 时频同步算法

文献[9]介绍了一种基于前缀码的 GFDM 同步方案,但由于循环前缀的影响,定时度量曲线会出现“平顶效应”,需要使用文献[12]中提出的办法来消除其影响,导致系统复杂度的增加。本文结合 OFDM 中定时同步算法^[13],将一种新的前缀码引入到 GFDM 系统中。

假定 GFDM 的前缀码块由 $M_p=2$ 个子符号及 K_p 个子载波组成。该数据块中,一个长度为 K_p 且关于中心点共轭对称的伪随机(Pseudo-Noise,PN)序列 $c=(c[0],\cdots,c[K_p/2-1],c[K_p/2],\cdots,c[K_p-1])^T$ 被传输两次,得到该前缀码承载的数据向量

$$d_p=(c[0],\cdots,c[K_p-1],c[0],\cdots,c[K_p-1])^T。$$

时域内,该前缀码满足前后重复特性的同时,前后两部分还具有关于各自中心点呈共轭对称的特点,其时域结构如图 3 所示,其中 B^* 与 A 呈共轭对称。

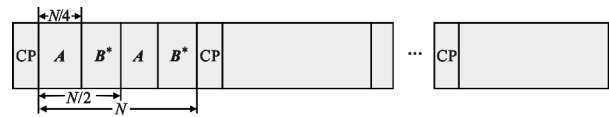


图 3 前缀码时域结构
Fig. 3 Time domain structure of the preamble

在接收端,接收序列 $r[n]$ 中,发射的前缀码必须至少被接收到一次,用于估计时间及频率偏移。根据接收序列 $r[n]$,得到其自相关函数

$$\rho[n]=\sum_{k=n}^{n+N/2-1}r[N/2-k]r[N/2+k],\tag{2}$$

进而可以得到其归一化自相关函数

$$\mu_s[n]=\frac{2|\rho[n]|^2}{\sum_{k=n}^{n+N/2-1}|r[k]|^2}.\tag{3}$$

这样就可以通过查找 $\mu_s[n]$ 的峰值点 $\hat{n}_s$ 获取 STO 的粗略估计:

$$\hat{n}_s=\operatorname{argmax}_n(\mu_s[n]).\tag{4}$$

由于其前缀码前后两部分相同,频偏仅会导致信号前后对应部分符号出现相位差,因此, $\rho[\hat{n}_s]$ 的角度揭示了频偏 $\hat{\varepsilon}$ 的影响,可以用来进行 CFO 的估计:

$$\hat{\varepsilon}=\frac{\angle\rho[\hat{n}_s]}{\pi}.\tag{5}$$

得到的频偏信息可以用来纠正接收序列的频率

偏移,纠正后的接收序列信息为

$$r'[n]=r[n]\cdot\exp(-j2\pi\frac{\hat{\varepsilon}}{N}n).\tag{6}$$

该算法相对于文献[9]中算法不会出现“平顶效应”,但由于其训练序列是共轭对称的,导致与正确定时位置相距 $N/4$ 处出现两个比较大的旁峰,影响定时的准确性,需对其做进一步的优化。本文利用纠正后的接收序列与已知发射前缀的互相关函数,得到更精确的定时估计。其互相关函数为

$$\rho_c[n]=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}r'[n+k]p_x[k].\tag{7}$$

式中: $p_x=Ad_p$, A 为发射矩阵; p_x 即将前缀码通过发射矩阵后得到的序列。由于前缀码由相同的两部分组成,因此在 $\rho_c[n]$ 中,与最高峰相距 $N/2$ 的位置有两个次高峰。于是将 $\rho_c[n]$ 与 $\mu_s[n]$ 结合起来,较好地抑制了旁峰的影响:

$$\mu_A[n]=|\rho_c[n]|\cdot\mu_s[n].\tag{8}$$

这样就可可在 $[\hat{n}_M-N/2,\hat{n}_M+N/2]$ 的范围内,通过查找 $\hat{n}_A$ 的峰值即可获取更精确的符号定时估计值。图 4 是对 $\mu_s[n]$ 、 $\rho_c[n]$ 、 $\mu_A[n]$ 在理想信道下进行的仿真。从图中可以看出,该算法可以消除旁峰的影响,仅在正确的定时位置出现尖峰,从而得到精确的符号定时。

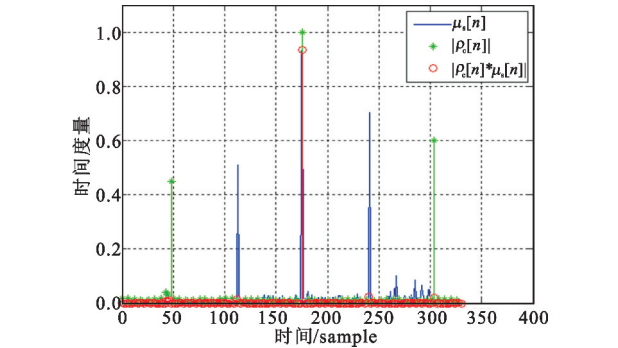


图 4 本文算法中 STO 精确估计
Fig. 4 The accurate estimation of STO in this paper

该算法与文献[9]中算法相比,通过引进共轭对称序列,构造出新的前缀码,实现了符号定时及载波频偏的准确估计。从整个同步算法实现的过程可以看出,两种算法均需要进行自相关函数的计算、自相关函数的归一化处理,以及修正后序列与发射前缀互相关函数的计算,但本文算法由于不会出现“平顶效应”,较原算法复杂度更低。

在理想信道情况下,由 $\mu_A[n]$ 尖锐的峰值可以得到精确的符号定时信息,但在频率选择性衰落信道中,初始信道的抽头增益会受到影响,其峰值可能会比其他回波低,影响符号定时的准确性。

为了在频率选择性衰落信道中实现符号定时同步,可以采用门限准则的方法^[14],根据设定的错误报警概率 p_{FA} ,在找到最大峰值之前识别出其他的多径峰值。门限值通过瑞利累积分布函数来获取,其值如下式所示:

$$T_{Th} = \sqrt{-\frac{4}{\pi} \ln(p_{FA})} \left(\sum_{k=-\frac{N}{2}+\lambda}^{-\lambda} \frac{|\rho_C[\hat{n}_A+k]|}{\frac{N}{2}-2\lambda} \right). \quad (9)$$

式中: λ 是根据信道冲激响应特性可以进行调节的参数值。符号定时即在 $(\hat{n}_A-\lambda, \hat{n}_A)$ 中进行估计,见下式:

$$\hat{n}_f = \underset{\hat{n}_A-\lambda < n \leq \hat{n}_A}{\operatorname{argfirst}} (|\rho_C[n]| > T_{Th}). \quad (10)$$

4 同步算法的性能分析

为了验证本文提出算法的性能,在频率选择性衰落信道中,对未知量时间偏移 θ 及频率偏移 ε 进行估计,并通过 STO 及 CFO 估计的均方误差,对本文算法及文献[9]算法的性能进行比较。仿真参数的设置如下:码元符号采用 16QAM;为了降低计算的复杂度,子载波数目 K 取 256,子符号数目 M 取 2,循环前缀长度取 32;多径搜索参数 λ 取 32;错误报警概率设定为 10^{-6} 。综合考虑仿真结果的准确性及系统的运行效率,在每个信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 值上仿真了 500 次,具体的仿真结果如图 5 和图 6 所示。

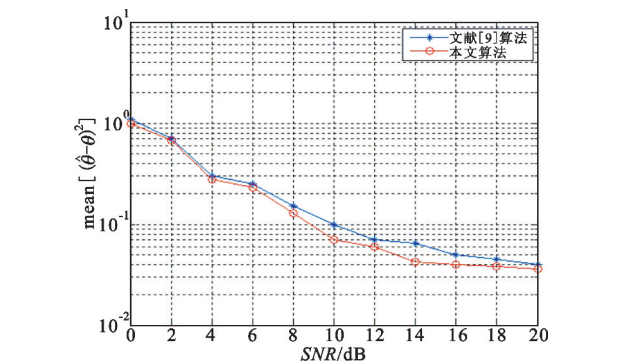


图 5 频率选择性信道下 STO 估计均方误差曲线
Fig. 5 MSE curve of the STO estimation in frequency-selective channel

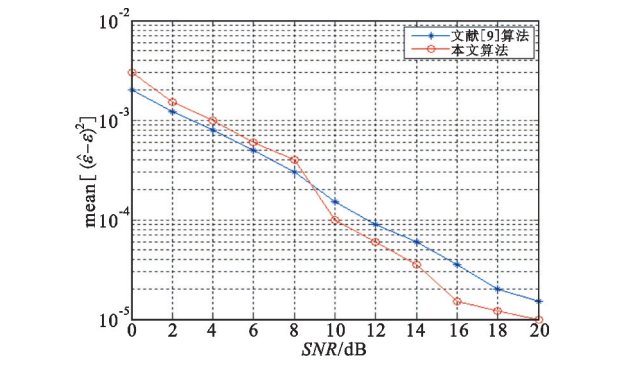


图 6 频率选择性信道下 CFO 估计均方误差曲线
Fig. 6 MSE curve of the CFO estimation in frequency-selective channel

图 5 给出了两种算法符号定时同步的均方误差曲线。由图中可以看出,本文算法的均方误差在信噪比变化的过程中低于文献[9]算法,其定时同步性能更优,定时同步的准确性得到了提升,解决了 GFDM 系统对时间偏移更为敏感的问题。图 6 的仿真结果表明,在信噪比低的情况,本文算法中频偏估计的均方误差曲线较文献[9]算法性能稍差,但随信噪比的增加,本文算法的性能提高较为明显,这主要是因为其频偏估计的精度受定时同步性能的影响,随着 SNR 的增加,定时同步性能明显优于原算法,其频偏估计精度也明显提高。

5 结束语

本文在基于前缀码同步算法的基础上,将一种具有共轭对称性的前缀码引入到 GFDM 系统中,介绍了一种新的时频同步算法。仿真结果表明,该算法可以获得与经典的 OFDM 方案相近的性能,且不会产生原算法中出现的“平顶效应”,降低了系统的复杂度。该算法还可较好地适应频率选择性衰落信道,面临实际复杂的信道环境,具有重要的实际意义。GFDM 作为下一代移动通信热门的候选,该算法主要解决了其同步问题,提升了其整体性能,使其可以在未来 5G 新场景中得到广泛的应用。未来计划将与多载波同步技术结合紧密的相关技术引入 GFDM 系统中,进一步提升系统性能。

参考文献:

[1] WUNDER G, JUNG P, KASPARICK M, et al. 5GNOW: non-orthogonal, asynchronous waveforms for future mobile applications[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 97-105.
[2] FETTWEIS G, KRONDORF M, BITTNER S. GFDM -

- generalized frequency division multiplexing [C]// Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona:IEEE,2009:1-4.
- [3] MICHAÏLOW N, MATTHE M, GASPARI I S, et al. Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(9):3045-3061.
- [4] MICHAÏLOW N, MENDES L, MATTHÉ M, et al. Robust WHT-GFDM for the next generation of wireless networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(1):106-109.
- [5] BAHAI A R S, SALTZBERG B R. Multi-carrier digital communications-theory and applications of OFDM[M]. New York:Springer,2004:83-101.
- [6] CHOI J H, LIM B J, KIM Y J, et al. Effect of timing and frequency synchronization errors on GFDM systems[C]// Proceedings of 2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence. Jeju: IEEE, 2015:1322-1325.
- [7] 罗仁泽. OFDM 系统中同步算法的分析与比较[J]. 电讯技术, 2006, 46(4):150-155.
- LUO Renze. Analysis and comparison among the synchronization schemes for OFDM systems[J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(4):150-155. (in Chinese)
- [8] KADUR T, GASPARI I, MICHAÏLOW N, et al. Non-data aided frequency synchronization exploiting ICI in non-orthogonal systems [C]//Proceedings of 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference. Vancouver: IEEE, 2014:1-5.
- [9] GASPARI I S, MENDES L L, MICHAÏLOW N, et al. A synchronization technique for generalized frequency division multiplexing [J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2014(1):1-10.
- [10] GASPARI I, FESTAG A, FETTWEIS G. Synchronization using a pseudo-circular preamble for generalized frequency division multiplexing in vehicular communication [C]// Proceedings of 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference. Boston:IEEE, 2015:1-5.
- [11] GASPARI I, FETTWEIS G. An embedded midamble synchronization approach for generalized frequency division multiplexing[C]//Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference. San Diego:IEEE, 2015:1-5.
- [12] MINN H, ZENG M, BHARGAVA V K. On timing offset estimation for OFDM systems [J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4(7):242-244.
- [13] PARK B, CHEON H, KANG C, et al. A novel timing estimation method for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5):239-241.
- [14] KASPARIS C. A cross-correlation approach for improved timing estimation in OFDM broadcasting systems [C]// Proceedings of 24th AIAA International Commu-

nications Satellite Systems Conference. San Diego: IEEE, 2006:1039-1048.

作者简介:



吴虹(1967—),女,天津人,教授、博士生导师,主要研究方向为无线通信技术;

WU Hong was born in Tianjin, in 1967. She is now a professor and also the Ph. D. supervisor. Her research concerns wireless communication techniques.

Email: wuhong@nankai.edu.cn

王冲(1986—),男,湖北襄阳人,2007年于解放军信息工程大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为多载波通信中的同步技术;

WANG Chong was born in Xiangyang, Hubei Province, in 1986. He received the B. S. degree from PLA Information Engineering University in 2007. He is now a graduate student. His research concerns synchronization techniques in multicarrier communications.

刘兵(1979—),男,河南人,2001年于西安邮电大学获学士学位,现为博士研究生,主要研究方向为无线通信;

LIU Bing was born in Henan Province, in 1979. He received the B. S. degree from Xi'an University of Posts and Telecommunications in 2001. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns wireless communications.

穆巍炜(1981—),男,辽宁锦州人,2005年于解放军重庆通信学院获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信;

MU Weiwei was born in Jinzhou, Liaoning Province, in 1981. He received the B. S. degree from PLA Chongqing Institute of Communications in 2005. He is now a graduate student. His research concerns wireless communications.

徐锡燕(1991—),女,江苏徐州人,2014年于南开大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信技术;

XU Xiyan was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1991. She received the B. S. degree from Nankai University in 2014. She is now a graduate student. Her research concerns wireless communications.

马肖旭(1991—),女,重庆人,2014年于南开大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信技术;

MA Xiaoxu was born in Chongqing, in 1991. She received the B. S. degree from Nankai University in 2014. She is now a graduate student. Her research concerns wireless communications.

李欣然(1990—),男,天津人,2013年于南开大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为无线通信技术。

LI Xinran was born in Tianjin, in 1990. He received the B. S. degree from Nankai University in 2013. He is now a graduate student. His research concerns wireless communications.