



# 一种改进的 TD-LTE 下行定时同步算法

白文乐<sup>1,2</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 张永梅<sup>1</sup>, 彭木根<sup>2</sup>

(1. 北方工业大学信息工程学院 北京 100144; 2. 北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

**摘要:** 针对正交频分复用定时同步实际应用问题, 利用循环前缀的统计能量差和统计相关特性, 提出了一种改进的 TD-LTE 下行定时同步算法, 减小了计算复杂度, 同时能检测循环前缀类型。仿真结果表明, 算法在多径衰落信道下, 特别是小信噪比条件下, 定时同步性能优越, 并对归一化频偏和多普勒频移变化具有较强的适应能力。

**关键词:** TD-LTE; 循环前缀; 下行; 定时同步

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2015030

## An Improved Algorithm for TD-LTE Downlink Time Synchronization

Bai Wenle<sup>1,2</sup>, Wang Xu<sup>1</sup>, Zhang Yongmei<sup>1</sup>, Peng Mugen<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Aimed at the application problem of timing synchronization algorithm in orthogonal frequency division multiplexing system, an improved algorithm for TD-LTE downlink time synchronization was proposed. It utilizes statistical energy difference and correlation of cyclic prefix to improve the system performance, which reduces the computational complexity, and can detect the cyclic prefix types. The simulation results demonstrate that the performance of the new method is excellent in multi-path fading channels, especially in the case of small SNR. And it is robust against the normalized frequency offset and Doppler shift.

**Key words:** TD-LTE, cyclic prefix, downlink, timing synchronization

## 1 引言

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术, 作为 TD-LTE 通信系统的核心技术, 不仅频

谱利用率高, 而且抗多径衰落性能优越。OFDM 系统各子载波相互正交重叠, 有效利用频谱资源, 将 OFDM 符号后部数据复制, 作为循环前缀(cyclic prefix, CP)插入前端, 从而有效消除符号间干扰(inter symbol interference, ISI)。但

收稿日期: 2014-08-12; 修回日期: 2015-01-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No.61371143), 国家科技支撑计划基金资助项目(No.2012BAH04F00), 北京市自然科学基金资助项目(No.4132026), 北京市教委数字内容标准及智能信息处理平台基金资助项目(No.PXM2013\_014212\_000120), 北京市教委数据采集与可视化处理平台基金资助项目(No.PXM2014\_014212\_000017), 2014 年研究生创新平台建设资助项目(No.14085)

**Foundation Items:** National Natural Science Foundation Project (No.61371143), Projects in the National Science & Technology Pillar Program (No.2012BAH04F00), Beijing Municipal Natural Foundation Project (No.4132026), The Digital Content Standards and Intelligent Information Processing Platform Project for the education commission of Beijing, China (No.PXM2013\_014212\_000120), The Data Acquisition and Visual Processing Platform Project for the education commission of Beijing, China (No.PXM2014\_014212\_000017), The Funding from 2014 Graduate Student Innovation Platform Construction Project (No. 14085)

是,时间和频率同步对 OFDM 性能至关重要。精确的定时同步,才能正确解调 OFDM 符号的有用数据;精确的频率同步,才能保证子载波正交性,消除载波间干扰(inter carrier interference,ICI)。最近几年,出现了许多有关定时同步的研究成果,Jan-Jaap 等人提出的最大似然(maximum likelihood,ML)法<sup>[1]</sup>性能优良,只适用于 AWGN 信道;Karthik 等人提出的统计相关算法<sup>[2]</sup>能有效消除 ISI,但未考虑频率影响;直接差分算法<sup>[3]</sup>也仅在大信噪比条件下适用;周恩等人综合相关算法和能量差算法<sup>[4]</sup>,达到了较好的效果,但没有考虑 CP 类型的影响,不能直接应用于 TD-LTE 下行定时同步。

本文在研究分析相关同步算法<sup>[1-4]</sup>的基础上,利用 CP 的统计能量差和统计相关特性,提出了一种 TD-LTE 下行定时同步改进算法,明显改进了系统性能,同时能有效检测 CP 类型。

## 2 系统信号模型

TD-LTE 信号,经过  $N$  点 IFFT 变换<sup>[4]</sup>后可用式(1)表示。

$$s[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S[k] e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

经过多径衰落信道,受到时延  $\theta$ 、归一化频偏  $\varepsilon$  和高斯白噪声  $w[n]$  影响的接收信号可用式(2)表示。

$$r[n] = y[n-\theta] e^{j\frac{2\pi\varepsilon n}{N}} + w[n] \quad (2)$$

假设理想多径时延信号为  $y[n]$ ,多径传播路径数为  $L$ ,第  $l$  条路径的衰落系数和时延样点分别为  $h_l$  和  $\theta_l$ ,则  $y[n]$  可表示为式(3)。

$$y[n] = \sum_{l=0}^{L-1} h_l s[n-\theta_l] \quad (3)$$

## 3 算法与理论分析

### 3.1 接收信号自相关函数

接收信号的自相关函数可以通过式(4)表示。

$$R[m,n] = E[r[n]r^*[n+m]] \quad (4)$$

将式(2)代入式(4),可得:

$$R[m,n] = E \left[ \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} h_l h_k s[n-\theta-\theta_k] s^*[n-\theta-\theta_k] \cdot e^{-j\frac{2\pi\varepsilon m}{N}} + w[n]w^*[n] \right] \quad (5)$$

当  $m=0$  时,即接收信号的平均功率  $P[n]$  可表示为:

$$P[n] = R[0,n] = P_s + P_{\text{ISI}} + P_w \quad (6)$$

$$P_s = \sum_{l=0}^{L-1} h_l^2 |s[n-\theta-\theta_l]|^2 \quad (7)$$

$$P_{\text{ISI}} = \sum_{l=0, k=0, k \neq l}^{L-1} h_l h_k E[s[n-\theta-\theta_l] s^*[n-\theta-\theta_k]] \quad (8)$$

$$P_w = \sigma_w^2 \quad (9)$$

其中,  $P_s$  为有用信号功率,  $P_{\text{ISI}}$  为多径引起的符号间干扰,  $P_w$  为高斯白噪声干扰,  $\sigma_w^2$  为高斯白噪声功率。

### 3.2 CP 及检测应用

CP 作为 OFDM 符号保护间隔,能有效抵御多径时延,保证子载波间正交性,避免符号间干扰,消除载波间干扰。当 CP 长度大于信道最大时延时,CP 后部数据一般不被干扰,与 OFDM 符号后部对应部分数据一致,即使受到多径干扰和噪声干扰,这两部分数据也有较大的相似度。基于 CP 的相关算法<sup>[2]</sup>和能量差算法<sup>[3]</sup>,利用 CP 这一特性,实现同步定时。

TD-LTE 系统 CP 类型<sup>[5,6]</sup>分为常规 CP 和扩展 CP。常规 CP 时,每个时隙第一个 OFDM 符号 CP 长度为  $5.21 \mu\text{s}$ ,其余 6 个符号 CP 长度为  $4.69 \mu\text{s}$ ;扩展 CP 时,每个 OFDM 符号 CP 长度均为  $16.67 \mu\text{s}$ 。如图 1 所示,  $N_{\text{cp1}}$ 、 $N_{\text{cp2}}$  表示常规 CP 中两个循环前缀 ( $N_{\text{cp1}} > N_{\text{cp2}}$ ) 占据的采样点数,  $N_{\text{cpe}}$  表示扩展 CP 占据的采样点数,  $N_{\text{m}}$  为 FFT 点数,  $N_{\text{slot}}$  为一个时隙 (0.5 ms) 所占据的采样点数。

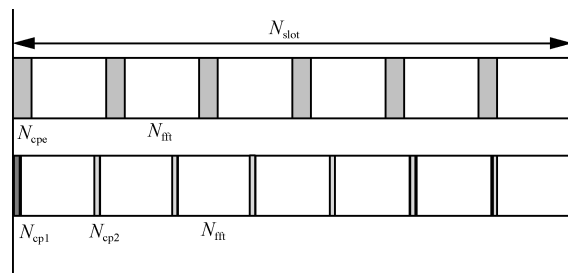


图 1 TD-LTE 系统 CP 类型

TD-LTE 系统用户设备(user equipment,UE)获得下行定时同步的传统步骤是:检测主同步信号(PSS),确定小区组内 ID,实现半帧定时;检测辅同步信号(SSS),确定小区组 ID,判断 CP 类型。因 CP 类型未知,检测 PSS 后,UE 按常规 CP 和扩展 CP 分别对 SSS 进行检测,需要 336 次相关运算,计算量很大。

PSS 和 SSS 在 TD-LTE 系统帧结构中的相对位置固定,PSS 总是占用子帧 1 和 6 的第 3 个 OFDM 符号,SSS 占



用子帧 0 和 5 的最后一个符号<sup>[5]</sup>。完成 PSS 检测后,如果 CP 类型确定,SSS 位置也就确定,SSS 检测运算量减半。

为此,参考文献[7]和参考文献[8]分别提出了简化方案,即先确定 CP 类型,再检测 SSS。参考文献[7]根据实验结果,通过设定门限值,检测 CP 类型,但计算量随 CP 类型变化,扩展 CP 时,性能得到改善。参考文献[8]利用接收信号滑动自相关运算,观察相关峰值间距,判断 CP 类型,明显降低了计算量和复杂度。

### 3.3 相关定时同步算法及分析

参考文献[1]提出的最大似然算法,是最早基于 CP 自相关的定时同步算法,当  $m=N$  时,接收信号的自相关函数如式(10)所示,其中  $k$  和  $l$  为路径相关取值变量。

$$R[N, n] = E \left[ \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} h_i h_k^* s[n - \theta - \theta_i] s^*[n + N - \theta - \theta_k] e^{-j2\pi\epsilon} \right] \quad (10)$$

$$R[N, n] = R_{k=l} + R_{k \neq l} \quad (11)$$

$$R_{k=l} = E \left[ \sum_{l=0, k=0, k=l}^{L-1} h_l^2 s[n - \theta - \theta_l] s^*[n + N - \theta - \theta_k] e^{-j2\pi\tau} \right] \quad (12)$$

$$R_{k \neq l} = E \left[ \sum_{l=0, k=0, k \neq l}^{L-1} h_l^2 s[n - \theta - \theta_l] s^*[n + N - \theta - \theta_k] e^{-j2\pi\tau} \right] \quad (13)$$

其中,  $\tau$  为时延,  $R_{k=l}$  为同路径信号自相关能量,即定时有用部分,同时存在非同路径信号相关能量  $R_{k \neq l}$  中的  $L \times (L-1)$  项干扰,在多径条件下,随着路径数  $L$  增大,干扰增强,采用参考文献[1]提出的算法进行定时估计,存在误差。该算法充分利用噪声不相关性及 CP 相关性,但未考虑多径影响<sup>[9]</sup>,在加性高斯白噪声信道条件下性能优异,受多径信道影响较大。

统计相关算法<sup>[2]</sup>对 ML 算法进行改进,利用多个 OFDM 符号对 CP 统计相关运算,经统计平均运算,尽量消除随机误差特别是多径干扰对 ML 算法的影响,使定时更精确,特别是改善了低信噪比条件下的定时性能,但需要知道 CP 长度(CP 长度需要额外检测),且未考虑频偏影响。

直接差分算法<sup>[3]</sup>利用 CP 数据相似性,将接收信号时延自相减,再移动平均处理、差分运算,消除了频偏的影响,能精确检测定时位置。但因 CP 的直接差分特性受到多径信道传输破坏,同时放大了噪声影响<sup>[4]</sup>,适合大信噪

比信道条件。

参考文献[4]对直接差分算法进行改进,提出了能量差分算法,由式(6)和式(10)可知,能量差分算法可消除频偏的影响,在大信噪比时改善定时性能,同时利用统计运算进一步提出统计能量差算法,消除随机误差,考虑到噪声和多径影响,巧妙地将统计能量差算法和统计相关算法结合起来,其定时效果大大改善,但未考虑到统计能量差和统计相关算法的内在联系,基于此,本文提出改进算法。

### 3.4 改进算法

基于参考文献[4],当  $m=N$  时,接收数据统计平均自相关函数可表示为:

$$R'[N, n] = \frac{1}{H} \sum_{h=0}^{H-1} r[n + hN_{\text{slot}}] r^*[n + hN_{\text{slot}} + N], \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (14)$$

其中,  $H$  为统计平均符号数。接收信号能量统计平均值可表示为:

$$E_1[n] = \frac{1}{H} \sum_{h=0}^{H-1} |r[n + hN_{\text{slot}}]|^2, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (15)$$

$$E_2[n] = \frac{1}{H} \sum_{h=0}^{H-1} |r[n + hN_{\text{slot}} + N]|^2, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (16)$$

归一化统计平均自相关函数如式(17)所示。

$$R'_{\text{nor}}[N, n] = \frac{|R'[N, n]|}{\sqrt{E_1[n]E_2[n]}}, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (17)$$

当  $m=0$  时,统计平均能量差分函数可表示为:

$$R'[0, n] = \frac{1}{H} \sum_{h=0}^{H-1} |r[n + hN_{\text{slot}}]|^2 - |r[n + hN_{\text{slot}} + N]|^2, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (18)$$

对统计平均能量差分函数进行修正,归一化统计平均能量差分函数如式(19)所示。

$$R'_{\text{nor}}[0, n] = \frac{|R'[0, n]|}{\sqrt{E_1[n]E_2[n]}}, \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (19)$$

当 CP 后部数据未被干扰时,式(19)对应部分波形应为凹形,且能量差分值均小于 1。将统计平均相关函数和统计平均能量差分函数结合,得到式(20)所示的凸函数。

$$R''_{\text{nor}}[0, n] = 1 - R'_{\text{nor}}[0, n], \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (20)$$

引入信噪比参数,对  $R'_{\text{nor}}[0, n]$  和  $R''_{\text{nor}}[0, n]$  进行加权运算,得到时刻  $n$  的相关能量值,如式(21)所示。

$$R[n] = (1 - \rho) R'_{\text{nor}}[N, n] + \rho R''_{\text{nor}}[0, n], \quad 0 \leq n \leq N_{\text{slot}} - 1 \quad (21)$$

其中,  $\rho$  定义为  $SNR/(SNR+1)$ ,  $SNR$  为信噪比<sup>[10]</sup>。

改进算法对统计能量差分函数进行处理, 将统计平均能量差与信号统计平均能量比值作为新度量, 省去了参考文献[4]中取平均再计算比值的步骤, 大大减小了算法计算量和计算复杂度, 提高了实用性。

同时, 本算法中  $H$  个平均符号的选取也与参考文献[7]不同。依据 TD-LTE 标准, 下行传输参数中的系统带宽、采样频率及 FFT 点数, 一旦确定其中之一, 0.5 ms 所占据的采样点数也就确定, 但 CP 类型还未知。由图 1 可知, 当 CP 类型未知时, 每个 OFDM 的符号长度也未知, 因此在 TD-LTE 系统中, 采用间隔一个 OFDM 符号进行算法度量, 理论上不太符合实际。本算法采用间隔  $N_{\text{sub}}$  样点, 即间隔一个时隙, 既能实现定时位置检测, 又能确定 CP 类型<sup>[9]</sup>。由于不同 CP 类型条件下, OFDM 符号长度也不同, 每个 OFDM 符号的定时起始位置不同。由于常规 CP 下, 即使第一个和第二个 OFDM 符号之间的定时距离也远小于扩展 CP 下的对应距离, 所以, 只需检测两个定时位置之间的间隔样点, 就可确定 CP 类型。相对于参考文献[7]和参考文献[8], 本算法能够同时实现定时同步和 CP 类型判断, 省去了单独检测 CP 类型的步骤, 使算法大大简化。TD-LTE 系统带宽、采样频率、FFT 点数及 CP 类型对照见表 1。

表 1 系统参数对照

| 系统带宽/<br>MHz | 采样频率/<br>MHz | FFT 点数 | CP 点数   |     |
|--------------|--------------|--------|---------|-----|
|              |              |        | 常规      | 扩展  |
| 1.4          | 1.92         | 128    | 9/10    | 32  |
| 3            | 3.84         | 256    | 18/20   | 64  |
| 5            | 7.68         | 512    | 36/40   | 128 |
| 10           | 15.36        | 1 024  | 72/84   | 256 |
| 15           | 23.04        | 1 536  | 108/120 | 384 |
| 20           | 30.72        | 2 048  | 144/160 | 512 |

由于 CP 后部数据未受到符号间干扰, 因此该数据区域为  $R[n]$  的峰值区。通过检测峰值区长度, 结合 CP 类型, 可以确定接收信号时延  $\theta$ , 且峰值区的上边界可作为 OFDM 符号定时起始位置。本算法的边界检测和参考文献[4]使用的方法相同, 采取度量函数最大值的  $\beta$  倍作为检测门限。 $\beta$  值的选取应尽量使峰值区包含 CP 的边界值, 且使干扰项最少。

4 仿真与性能分析

为了验证算法在多径、频偏衰落信道下的性能, 利用

MATLAB 在不同影响因素条件下进行了仿真。仿真参数为: 系统参数 1.4 MHz、子载波间隔 15 kHz、采样频率 1.92 MHz、128 点 FFT、72 个子载波、扩展 CP (32 个采样点)。采用 5 径信道, 时延功率谱服从指数分布  $e^{-t/T}$  ( $T$  是 CP 长度的 1/4),  $\beta=0.8$ 。

如图 2 所示, 在相同条件 (多普勒频移为 132 Hz、归一化频偏为 0.01) 下, 本文算法的定时性能明显比参考文献[4]算法更优。特别是小信噪比情况下, 若达到相同性能, 本文算法比原算法信噪比改善 10 dB 以上。本文算法对能量差分函数的归一化处理, 用类似于相关函数的处理方式。归一化能量差在  $m=0$  时, 滑动  $N$  点自相减, 即能量差算法, 实质是类相关算法。类相关算法在小信噪比时, 定时同步性能更优, 故本文算法在小信噪比时性能得到明显改善。

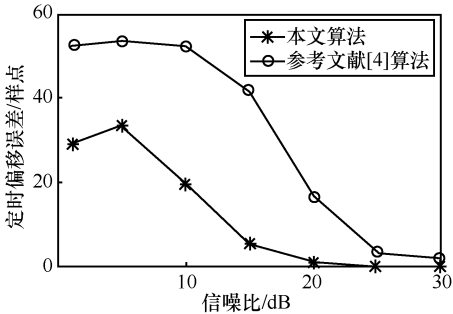


图 2 定时偏移误差性能

图3是信噪比为 25 dB、多普勒频移为 132 Hz 时, 归一化频偏变化对两种算法的影响。两种算法的抗频偏能力都很强, 参考文献[4]算法定时偏移误差稳定在 1.5 左右, 本文算法稳定在 0.3 左右。这是因为本文算法综合能量差算法和相关算法的优点, 能量差算法不受频偏影响, 由式(10)可知, 相关算法虽然受到频偏影响, 但本文改进算法对相关函数做了统计平均处理, 大大降低了频偏的影响。

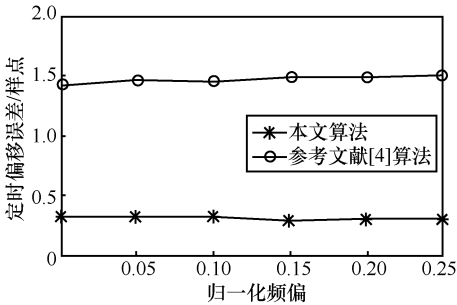


图 3 归一化频偏变化对两种算法的影响



图4给出了两种算法受多普勒频移影响的性能比较(信噪比为25 dB,归一化频偏为0.01)。在小频移时,两种算法的定时偏移都较小。在大频移时,多普勒频移造成频域弥散,时域信号能量越集中,能量差算法性能越好,定时偏移误差均随频移波动下降,且本文算法稳定性更高。

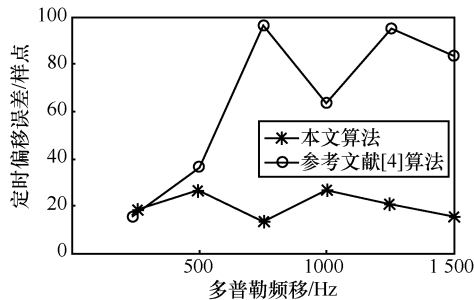


图4 多普勒频移影响

## 5 结束语

本文对基于CP的OFDM定时同步算法进行研究,利用统计能量差和统计相关特性,结合TD-LTE循环前缀的特点,对参考文献[4]算法进行了改进。仿真结果表明,改进算法定时同步性能优越,特别是小信噪比条件下比原算法更优,对归一化频偏和多普勒频移变化具有较强的适应能力。

## 参考文献

- 1 Van de Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800~1805
- 2 Ramasubramanian K, Baum K. An OFDM timing recovery scheme with inherent delay-spread estimation. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Dallas, TX, USA, 2001: 3111~3115
- 3 Takahashi K, Saba T. A novel symbol synchronization algorithm with reduced influence of ISI for OFDM systems. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, Dallas, TX, USA, 2001: 524~528
- 4 周恩, 陈茅茅, 王文博. 多径衰落信道下OFDM定时同步算法的研究. 北京邮电大学学报, 2005, 28(3): 62~64  
Zhou N, Chen M M, Wang W B. Anorel timing estimation method for OFDM systems over multipath fading channels. Journal of Beijing University of Post and Telecommunications, 2005, 28(3): 62~64

- 5 3GPP TS 36.211, V10.5.0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA). Physical Channels and Modulation(Release 10), 2012
- 6 Xu W, Manolakis K. Robust synchronization for 3GPP LTE system. Proceedings of IEEE Global Communications Conference, Miami, FL, USA, 2010: 1~5
- 7 Kim Y B, Chang K H. Complexity optimized CP length pre-decision metric for cell searcher in the downlink of 3GPP LTE system. Proceedings of IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Symposium, Tokyo, Japan, 2009: 895~899
- 8 林雁, 乐光新, 尹长川. LTE 小区搜索中循环前缀类型判决和辅同步信号检测算法的改进. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(2): 499~504  
Lin Y, Le G X, Yin C C. Improvement of CP type decision and SSS detection algorithm in cell search for LTE system. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(2): 499~504
- 9 邱育军, 侯晓林, 乐光新. 无线弥散信道下OFDM系统中时间同步方案的比较分析. 北京邮电大学学报, 2003, 26(3): 75~80  
Kuang Y Z, Hou X L, Le G X. A comparative anglysis on time synchronization schemes in OFDM systems based upon dispersive channel model. Journal of Beijing University of Post and Telecommunications, 2003, 26(3): 75~80
- 10 Li X W, Wang Z Y, Liu F. A simplified scheme of synchronization algorithm in TD-LTE system. Proceedings of IEEE the 5th International Conference on Advanced Computational Intelligence, Nanjing, China, 2012: 1158~1161

## [作者简介]



白文乐,男,博士,北方工业大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为移动通信关键技术与无线通信网络。

王旭,男,北方工业大学硕士生,主要研究方向为移动通信。

张永梅,女,博士,北方工业大学教授、硕士生导师,主要研究方向为无线通信信号与信息处理。

彭木根,男,北京邮电大学教授、博士生导师,主要研究方向为未来无线网络理论及技术研究。