

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.08.007

引用格式:张景,余忠洋,白宝明.基于“绿色通信”理念的自适应载波同步系统方案[J].电讯技术,2016,56(8):867-872. [ZHANG Jing, YU Zhongyang, BAI Baoming. An adaptive carrier synchronization system scheme based on “Green Communication” concept[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(8):867-872.]

基于“绿色通信”理念的自适应载波同步系统方案*

张景**¹, 余忠洋², 白宝明²

(1. 中国电子科技集团公司第七研究所, 广州 510220;
2. 西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安 710071)

摘要:针对当前载波同步算法在低信噪比下存在的开销大和复杂度高的问题,提出了一种基于“绿色通信”理念的自适应载波同步系统设计方法。首先利用控制参数法使最佳性能方案向次最佳性能方案转化,然后在满足较小信噪比损失的前提下比较各方案并给出具有开销小和复杂度低的方案。仿真结果表明相比最佳性能方案,次最佳性能方案的导频开销和复杂度分别可降17%和38%,因而非常符合“绿色通信”的理念。

关键词:绿色通信;自适应载波同步;低信噪比;控制参数法

中图分类号: TN911.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2016)08-0867-06

An Adaptive Carrier Synchronization System Scheme Based on “Green Communication” Concept

ZHANG Jing¹, YU Zhongyang², BAI Baoming²

(1. The 7th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Guangzhou 510220, China;
2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Considering both large cost and high complexity of current carrier synchronization systems at low signal-to-noise ratio (SNR), this paper presents an adaptive carrier synchronization system design method based on the concept of “green communication”. First, the control parameter method is adopted to make the optimal performance scheme translate into suboptimal ones. Then, under the premise of satisfying fewer SNR losses, the suboptimal schemes are compared and some schemes with both small cost and low complexity are given. Simulation results show that compared with the optimal performance scheme, normalized pilot cost and complexity of the suboptimal ones can be reduced by 16% and 38% respectively, thus being accordable with the concept of “green communication”.

Key words: green communication; adaptive carrier synchronization; low SNR; control parameter method

1 引言

“绿色通信”是指节能减排、减少环境污染和资源浪费从而实现对物质循环利用的新一代通信理念,通过采用创新的高效功放、自适应控制等技术,

对通信基站的各部分进行适当改造,以达到节能减排的目的,最终实现通信上的可持续发展^[1]。因此,通信领域的方方面面都应当遵循这一理念。对于一个通信系统而言,载波同步是至关重要的部分。

* 收稿日期:2016-05-16;修回日期:2016-07-18 Received date:2016-05-16;Revised date:2016-07-18

** 通信作者:zhangjing_gz@sina.com Corresponding author:zhangjing_gz@sina.com

对于一个同步系统来说,设计一个有效的同步算法起着非常关键的作用。而这种算法应该符合“绿色通信”的理念,即开销小(“节能”)和复杂度低(“减排”)。传统的载波同步算法主要分为数据辅助(Data-Aided, DA)和非数据辅助(Non-Data-Aided, NDA)两类。其中,DA 算法^[2]无法兼顾信噪比门限和估计范围,尤其在低信噪比下,通常需要大量的数据开销(比如导频)来提高估计精度,故不符合“绿色通信”的理念。而 NDA 算法一般利用解调软信息^[3]或译码软信息^[4]对载波频、相偏进行估计,估计精度较高,但搜索频偏范围较大,因而复杂度很高,故亦不符合“绿色通信”的理念。另外,对于这两类算法,均只能通过控制单个参数(比如导频或数据)来获得性能的改善,所以自适应能力较差。结合传统载波同步算法的优点,文献[5-10]提出了一种联合导频和解调软信息或译码软信息的载波同步算法。其中,文献[5-6]分别提出了一种旋转平均周期图(Rotational Periodogram Averaging, RPA)或最大似然(Maximum Likelihood, ML)联合解调软信息的载波同步算法,在大频偏下利用有限的导频开销均可以获得较高的估计精度,但细估计中采用的频相二维盲搜索导致了很高的复杂度。文献[7-10]利用低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)码和 Turbo 乘积码(Turbo Product Code, TPC)的译码软信息对载波频偏进行细估计,在较小的频偏下仅需很少的导频开销就能够获得较高的估计精度,但其复杂度较高且不适用大频偏的情况。所以这些联合的同步算法都不符合“绿色通信”的理念。与传统的 DA 或 NDA 算法相比,它们可以通过控制两个或多个参数(比如导频、数据和自定义参数等)来改善性能,因而具有较好的自适应能力。综上,在低信噪比的环境下,实现小开销和低复杂度的自适应载波同步是当前“绿色通信”中的一个研究热点。

针对上述存在的问题,本文提出了一种基于“绿色通信”理念的自适应载波同步方案。首先利用控制参数法(后文将提及的导频长度和相关长度)来实现最佳性能方案向次最佳性能方案的转化,即实现系统的自适应性;然后在满足较小信噪比损失的前提下,通过比较各次最佳方案的结果得到具有小开销和低复杂度的方案,即实现系统的“绿色通信”。另外,该设计方法不局限于具体的调制编码系统,只要给出合理的参数设置即可实现“绿色通信”,具有普遍适用性。

2 自适应载波同步系统模型

图 1 给出了基于“绿色通信”理念的自适应载波同步系统模型。该系统分为发送端、移动信道和接收端 3 个部分。在发送端,首先将一定长度的信息序列进行编码,再将一定长度的导频序列平均分成 m 块(即 $P_1 = P_2 = \dots = P_m$),经复用器与编码后的信息序列组成一个 PMPM(Preamble-Middle-Preamble)结构^[11]的数据帧,如图 2 所示,其中编码块的长度 $D_1 = D_2 = \dots = D_q$ 。为了便于后文分析,首先定义比值 $\eta = mP_1 / (mP_1 + qD_1)$ ($q \geq m$),称作导频开销,用来表征一帧中导频的占有率。经过调制后得到复基带信号,再通过移动高斯白噪声信道(不失一般性,假设该信道的信号功率增益为 1),则接收端接收到的离散基带信号可以表示为

$$r_k = s_k \exp[j(2\pi f_d T_s k + \theta)] + n_k, k = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

式中: T_s 为符号周期; f_d 和 θ 分别为载波频偏和相偏; s_k 为包含导频和编码信息的调制信号; n_k 为零均值、 $N_0/2$ 方差的高斯随机变量; N 为一帧的总符号长度。

然后接收信号送至解复用器,提取出导频并送到联合可控参数估计器中进行载波粗估计,得到载波频偏和相偏的粗估值,再对接收信号进行补偿,将补偿后的信号重新送至解调器和译码器,译码器输出的译码序列经编码、基带调制又重新送至联合可控参数估计器中进行载波细估计,得到剩余频偏和剩余相偏的估计值,再对粗估计补偿后的信号进行补偿,最终再进行解调、译码,恢复出原始的信息序列。

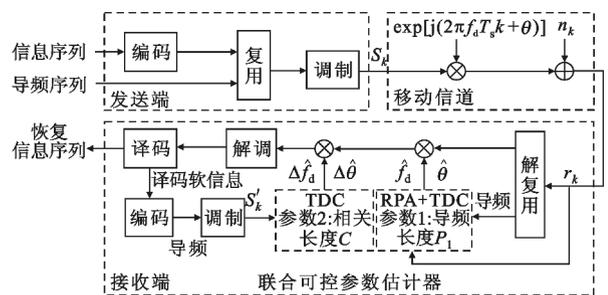


图 1 系统模型
Fig. 1 System model

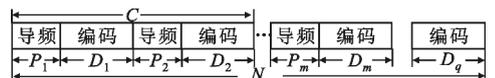


图 2 数据帧结构
Fig. 2 Data frame structure

3 自适应载波同步算法

在图 1 所示的系统模型中,联合可控参数估计分为粗估计和细估计两个部分。其中,粗估计部分采用 DA 的 RPA 和时域相关(Time-Domain Correlation, TDC)算法;细估计部分采用 DA-编码辅助(Code-Aided, CA)的 TDC 算法。另外,相偏的粗估计和细估计均采用 ML 算法。为了提高系统的最终性能,这里将图 2 所示的 PMPM 结构简化为 PM 结构,即导频序列平均分成两块插至编码信息序列中。接下来详细说明载波频偏与相偏的估计过程。

3.1 载波频偏估计

3.1.1 DA RPA 和 TDC 频偏粗估计

首先将接收到的基带信号通过解复用进行信号分离,提取出导频序列 $\{r_k, k=1, 2, \dots, P_1\}$, 并计算其去调制序列 $\{z_k, k=1, 2, \dots, P_1\}$, 其中 $z_k \triangleq r_k s_k^*$, $(\cdot)^*$ 表示取共轭运算。再对去调制信号 z_k 进行 L 次频偏旋转, 可获得 L 个旋转信号 $\{\tilde{z}_{k,l}, l=1, 2, \dots, L\}$, 其中 $\tilde{z}_{k,l} \triangleq z_k \exp(j2\pi f_l k T_s)$, $f_l \triangleq l/LTN_1$ 为第 l 次的旋转频偏, N_1 为快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)点数。接着分别计算出 L 个旋转信号的周期图, 并取平均值, 即可得到平均周期图估计 C_k , 其中 $C_k \triangleq \sum_{l=1}^L \text{FFT}(\tilde{z}_{k,l}, N_1)/L$ 。然后, 根据平均周期图中的最大谱峰和频偏旋转原理, 便可以获得载波频偏的粗估值, 即

$$\hat{f}_{\text{RPA}} = \frac{k_m}{TN_1} + \frac{l_m}{LTN_1} \quad (2)$$

式中: $k_m = \arg\max_k \{C_k\}$ 为最大谱峰所对应的索引; $l_m = \arg\max_l (\text{FFT}(\tilde{z}_{k,l}, N_1)) | k = k_m$ 为已知最大谱峰索引下频偏旋转的次数, $\arg\{\cdot\}$ 表示取幅角运算, $\max\{\cdot\}$ 表示取最大值运算。最后利用 RPA 得到的频偏对接收信号进行一次校正, 再将校正后的信号通过解复用进行信号分离, 提取出两块导频序列 $\{r_k, k=1, 2, \dots, P_1, P_1+D_1, \dots, P_1+D_1+P_2\}$, 利用上述方法求出去调制序列 $\{z'_k, k=1, 2, \dots, P_1\}$, 其中 $z'_k \triangleq r_k \exp(-j2\pi \hat{f}_{\text{RPA}} T_s k) s_k^*$ 。那么基于 TDC 算法可得剩余频偏的估计值, 即

$$\Delta \hat{f}_{\text{TDC}} = \frac{1}{2\pi(D_1+P_1)T_s} \arg\left\{ \sum_{k=1}^{P_1} z'_k{}^* \sum_{m=1}^{P_1} z'_{m+P_1+D_1} \right\} \quad (3)$$

最后将频偏估计值 \hat{f}_{RPA} 和 $\Delta \hat{f}_{\text{TDC}}$ 相加即可得到载波频偏的粗估值 \hat{f}_d 。

3.1.2 DA-CA TDC 频偏细估计

首先利用粗估计得到的 \hat{f}_d 和 $\hat{\theta}$ (见 3.2 节) 对接收信号 $\{r_k, k=1, 2, \dots, N\}$ 进行频偏和相偏的一次补偿, 再将补偿后的信号进行解调、译码得到信息序列, 接着将信息序列重新编码、复用和基带调制获得基带调制信号 $\{s'_k, k=1, 2, \dots, C\}$, 其中 C 为图 2 所示的信息序列长度, 称作相关长度。同时计算相关长度的去调制信息 z''_k , 即

$$z''_k \triangleq r_k \exp[-j(2\pi \hat{f}_d T_s k + \hat{\theta})] s'_k{}^*, k=1, 2, \dots, C。$$

再通过 TDC 算法计算出剩余频偏的细估值, 即

$$\Delta \hat{f}_d = \frac{1}{2\pi(C/2)T_s} \arg\left\{ \sum_{k=1}^{C/2} z''_k{}^* \sum_{n=1}^{C/2} z''_{C/2+n} \right\} \quad (4)$$

最后利用 $\Delta \hat{f}_{\text{dl}}$ 和 $\Delta \hat{\theta}_1$ (见 3.2 小节) 对补偿后的接收信号进行二次补偿, 再解调、译码即可恢复出原始的信息序列。

3.2 相偏估计

在粗估计中, 利用导频序列得到的去调制序列 $\{z_k, k=1, 2, \dots, P_1\}$, 通过 ML 算法可以得到相偏的粗估值, 即

$$\hat{\theta} = \arg\left\{ \sum_{k=1}^{P_1} z_k \exp(-j2\pi \hat{f}_d T_s k) \right\} \quad (5)$$

在细估计中, 需将在粗估计中得到的频偏估计值和相偏估计值补偿到接收信号中, 同时提取前 C 个译码软信息并去调制得到 $\{z''_k, k=1, 2, \dots, C\}$, 再通过 ML 算法便能够得到相偏的细估值, 即

$$\Delta \hat{\theta} = \arg\left\{ \sum_{k=1}^C z''_k \right\} \quad (6)$$

4 基于“绿色通信”理念的自适应载波同步系统设计

在图 1 所示的联合可控参数估计器中, 粗估计和细估计的可控参数分别为导频长度 P_1 和相关长度 C 。通过适当的调整这两个参数, 便可获得接近于理想同步的最佳性能方案或可接受信噪比损失的次最佳性能方案, 从而实现其自适应的“绿色通信”。为了满足实际通信系统的要求, 规定可接受的信噪比损失为 1 dB 以内。

4.1 可控参数的最佳设置原理

由于频偏随时间的积累给数据会带来严重的影响, 因此对于给定的数据长度首先应由剩余频偏对误码性能的影响确定系统可容忍的剩余频偏, 此剩

余频偏作为算法应达到的最终估计精度(本文设定 $E_b/N_0 = 3.75$ dB 时归一化频偏均方根误差为 2×10^{-6})。TDC 算法的估计精度由相关长度 C 决定,因此细估计阶段的相关长度 C 应由最终的估计精度确定。在粗估计阶段,RPA 算法的剩余频偏应在 TDC 算法的估计范围 ($1/2D, D = P_1 + D_1$ 为相邻两个导频符号的间隔,简称导频间隔)内,而利用两段导频的 TDC 算法的估计范围又由导频间隔 D 确定,即 D 越大,估计精度越高,但估计范围越小。这样势必会对 RPA 算法的估计精度提出很高的要求,即需要增加 P_1 。因此在参数设置中,为了减小 P_1 ,可以选择较小的 D (这里假设两导频块之间的数据长度 D_1 是已知量,类似还有 RPA 算法中的旋转因子 L 和 FFT 点数等),再结合 RPA 估计的统计特性(即单次估计的概率分布情况),进一步对导频长度 P_1 作最佳设置。本文之所以考虑单次估计的概率分布,其原因在于如果粗估计中仅考虑 RPA 算法的估计均方根误差,而当某一次其估计值超出 TDC 算法的估计范围时,就会造成粗估计的估计精度的严重下降。因此需要将两者结合起来分析,这样才能获得最佳的 P_1 和估计性能。同理,在相关长度 C 的最佳设置中也应考虑上述原理。

4.2 基于“绿色通信”理念的自适应系统方案

下面以 TPC 编码加成形偏移正交相移键控(Shaped-Offset Quadrature Phase-Shift Keying, SO-QPSK)调制的传输方案为例,给出各方案的仿真结果和分析。仿真中:TPC 子码为(32,26)扩展汉明码,即每个编码块的长度 $D_1 = 513$,导频块数 $m = 2$,编码块数 $q = 12$;调制方式为 MIL SOQPSK 调制;每符号采样点数为 2;归一化载波频偏 $|f_d T_s| \leq 0.5$;相偏 $|\theta| \leq \pi$;单个导频长度 P_1 和相关长度 C 待定。

4.2.1 最佳性能方案

根据 4.1 节中的参数设置原理,通过仿真发现,当导频符号长度 $P_1 = 200$ (此时导频开销 $\eta = mP_1 / (mP_1 + qD_1) = 2 \times 200 / (2 \times 200 + 12 \times 513) \approx 0.06$)和相关长度 $C = 2P_1 + 8D_1 = 4504$ 时,其误码性能非常接近于理想同步的误码性能(即载波频偏和相偏均为 0 时系统所获得的误码性能),故称之为最佳性能方案。图 3 给出了该方案的误比特率(Bit Error Rate, BER)曲线,可以看出,当 BER 为 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 时,其信噪比损失仅为 0.1 dB,远远小于 1 dB,

完全满足实际通信系统的要求。

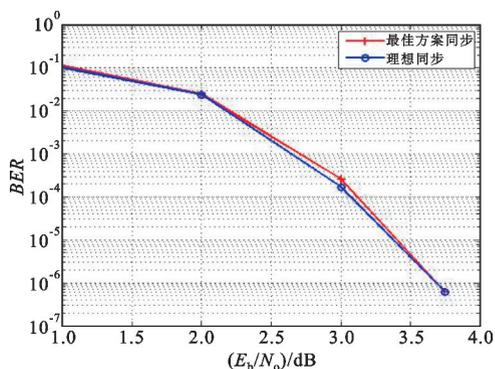


图3 最佳性能方案的 BER 曲线

Fig. 3 BER curves of the optimal performance scheme

4.2.2 基于“绿色通信”理念的次最佳性能方案

在最佳性能方案的基础上,适当的降低 P_1 或 C ,便可以获得次最佳性能方案。而在这些方案中必定存在一个或若干个兼顾导频开销小和复杂度低的折衷方案。根据数学中控制变量法的原理,两个可控参数有以下 3 种方案。

(1) 方案 1:降低导频长度 P_1

此时对应的 $C = 2P_1 + 8 \times 513$ 。在 4.2.1 节的最佳性能方案中, $P_1 = 200, C = 4504$,此时信噪比损失仅为 0.1 dB。显然,降低 P_1 会导致信噪比损失变大。换句话说,若过分降低 P_1 ,就会导致信噪比损失超出 1 dB,从而不满足实际通信系统的要求。因此为了尽可能获得小开销和低复杂度,通过仿真发现,当 $P_1 = 170$ (此时导频开销 $\eta = 2 \times 170 / (2 \times 170 + 12 \times 513) \approx 0.05$)时,信噪比损失已经达到了 0.8 dB,接近于 1 dB,如图 4 所示,但较大的性能损失却换来了较低的导频开销和复杂度。

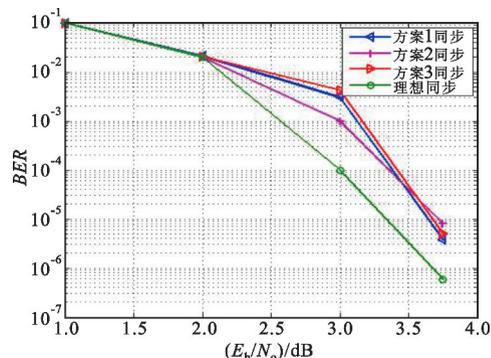


图4 次最佳性能方案的 BER 曲线

Fig. 4 BER curves of the suboptimal performance schemes

(2) 方案 2:降低相关长度 C

这里 $P_1 = 200$ (此时导频开销同最佳性能方

案),相应的 $C=400+513n$,其中 n 为细估计中所需的 TPC 块数即译码软信息的长度。显然,降低 C 等价于减小 n , n 的取值越小,其复杂度越低。为了尽可能地降低复杂度,通过仿真发现,当 $n=2$ 即 $C=400+513\times 2=1\ 426$ 时,信噪比损失达到了 0.5 dB,小于 1 dB,如图 4 所示。从性能上看,该方案要比方案 1 好,但就导频开销和复杂度来说,它都不如方案 1。

(3) 方案 3:同时降低 P_1 和 C

方案 1 和方案 2 的参数控制都是单一的。在本方案中,参数 P_1 和 C 均是可变的且只在下降的方向上变化。比较方案 1 和方案 2 可知, P_1 和 C 对性能的影响程度不同,且 P_1 的影响较 C 的大。所以, P_1 的取值区间为 (170,200),而 C 的设置取决于 $n \in (2,8)$ 。通过仿真发现,当 $P_1=180$ (此时导频开销 $\eta=2\times 180/(2\times 180+12\times 513)\approx 0.055$) 和 $C=2\times 180+4\times 513=2\ 412$ 时,信噪比损失可达到 0.7 dB,但仍小于 1 dB,如图 4 所示,也同样带来了较低的导频开销和复杂度。

与最佳性能方案相比,这 3 个次最佳性能方案都带来了一定的性能损失。究其原因在于方案 1 和方案 3 中降低 P_1 的方法对于利用数据辅助的粗估计而言危害很大。因为在粗估计后残留了较大的剩余频偏从而不利于细估计中译码器的收敛,进而导致整体误码性能的恶化。而方案 2 中降低 C 的方法仅对编码辅助的细估计有影响,虽然性能上也有损失,但较方案 1 和方案 3 要小。

5 总体评估与分析

为了便于对各方案进行评估和分析,现作如下说明:

(1) 以最佳性能方案为基准,并假设其复杂度为单位 1,从而可将其他 3 个方案的复杂度作归一化处理,以便于比较;

(2) 总体复杂度的计算主要考虑了算法中的乘法和加法运算,忽略了算法中需要的去调制、求最大值、求幅角的运算;根据第 3 节可以得到粗估计复加次数+细估计复加次数 $=3LP_1(3P_1-1)+2P_1-4+C$,粗估计复乘次数+细估计复乘次数 $=LP_1(9P_1+1)+2$;

(3) 对于信噪比损失在 1 dB 以内,且导频开销和复杂度均有所降低的方案,可称作“绿色通信”;反之,称之非“绿色通信”。

根据上述 3 个说明,表 1 给出了各方案的总体评估情况。

表 1 自适应方案的总体评估

Tab. 1 Overall evaluation of the adaptive schemes

自适应方案	P_1	C	信噪比损失/dB	导频开销 η	复杂度	是否为绿色通信
最佳方案	200	4 504	0.1	0.060	1.00	否
方案 1	170	4 444	0.8	0.050	≈ 0.72	是
方案 2	200	1 426	0.5	0.060	≈ 1.00	否
方案 3	180	2 412	0.7	0.055	≈ 0.81	是

由此可见,在信噪比损失均满足 1 dB 的前提下,我们可以得出以下结论:

(1) 对于最佳性能方案,性能损失仅为 0.1 dB,但同时带来了较大的导频开销和复杂度,故不符合“绿色通信”的理念;

(2) 与最佳性能方案相比,方案 1 和方案 3 的性能损失都较大,但却换来了较小的导频开销和复杂度,达到了“节能”和“减排”的效果,故符合“绿色通信”的理念;

(3) 方案 2 的性能损失为 0.5 dB,较方案 1 和方案 3 都小,但其导频开销和复杂度均没有改善(显然仅改变 C 的方案是不可取的),故也不符合“绿色通信”的理念;

(4) 方案 1 与方案 2 相比,这两种仅改变单一参数的方式对系统性能(即信噪比损失、导频开销和复杂度)的影响不同,且仅改变 P_1 的影响较大。方案 1 与方案 3 相比,这两种方案均符合“绿色通信”的理念,但是后者的信噪比损失较前者的少。

因此,我们可以这么认为:方案 1 为极大“绿色通信”方案,方案 3 为折衷“绿色通信”方案。

6 结束语

本文针对当前载波同步算法在低信噪比下忽略了“节能减排”(即开销尽可能小和复杂度尽可能低)的问题,提出了一种基于“绿色通信”理念的自适应载波同步系统设计方案。首先利用控制参数法使最佳性能方案向次最佳性能方案转化,即实现了系统的自适应性;然后在满足较低信噪比损失的前提下,筛选出具有开销小和复杂度低的方案,从而实现了“绿色通信”的理念。此外,该设计方案不局限于具体的调制编码系统,因而具有普遍适用性。下一步将深入研究该设计方案在非高斯白噪声信道(如衰落信道等)下的性能。

参考文献:

[1] VERECKEN W, HEDDEGHEM W, COLLE D, et al. O-

- verall ICT footprint and green communication technologies [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). Limassol, Cyprus; IEEE, 2010: 1-6.
- [2] MENGALI U, DANDREA A N. Synchronization techniques for digital receivers [M]. New York: Plenum Press, 1997: 79-97.
- [3] 张毅, 欧阳志新, 邓云凯, 等. 高性能无数据辅助 QPSK 频偏估计新算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(2): 187-193.
ZHANG Yi, OUYANG Zhixin, DENG Yunkai, et al. New high performance non-data-aided frequency estimation and implementation of QPSK [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(2): 187-193. (in Chinese)
- [4] HERZET C, RAMON V, VANDENDORPE L. A theoretical framework for iterative synchronization based on the sum-product and the expectation-maximization algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(5): 1644-1658.
- [5] 许林, 王雪梅. 基于 Turbo 码迭代的低信噪比载波同步技术 [J]. 电讯技术, 2012, 52(11): 1741-1745.
XU Lin, WANG Xuemei. Carrier synchronization technique based on Turbo iteration at low signal-to-noise ratios [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(11): 1741-1745. (in Chinese)
- [6] 孙锦华, 刘鹏, 吴小钧. 联合旋转平均周期图和解调软信息的载波同步方法 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2200-2205.
SUN Jinhua, LIU Peng, WU Xiaojun. A joint rotational periodogram averaging and demodulation soft information carrier synchronization algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(9): 2200-2205. (in Chinese)
- [7] 孙锦华, 朱吉利, 吴小钧. 导频和软信息联合辅助的短突发成形偏移 QPSK 载波同步 [J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(4): 16-23.
SUN Jinhua, ZHU Jili, WU Xiaojun. Joint pilot and soft information assisted carrier synchronization for short burst SOQPSK signals [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(4): 16-23. (in Chinese)
- [8] 沈海鸥, 王永民, 许华. 基于 EM 的低复杂度迭代载波同步算法 [J]. 电讯技术, 2013, 53(7): 890-894.
SHEN Haiou, WANG Yongmin, XU Hua. An EM-based low complexity iterative carrier synchronization algorithm [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(7): 890-894. (in Chinese)

- [9] 晏辉, 唐发建, 张忠培. 一种基于低码率 LDPC 码的编码与导频联合辅助载波同步算法 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 470-474.
YAN Hui, TANG Fajian, ZHANG Zhongpei. A joint assisted carrier synchronization algorithm with code and pilot based on low rate LDPC code [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 470-474. (in Chinese)
- [10] 孙锦华, 韩会梅. 低信噪比下时频联合的载波同步算法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 62-68.
SUN Jinhua, HAN Huimei. Joint time-domain and frequency-domain carrier synchronization algorithm in low signal to noise ratio [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 62-68. (in Chinese)
- [11] YING Y, GHOGHO M. Optimal pilot placement for frequency offset estimation and data detection in burst transmission systems [J]. IEEE Communications Letter, 2005, 9(6): 549-551.

作者简介:



张 景 (1974—), 男, 福建上杭人, 1996 年于西安电子科技大学通信工程学院获学士学位, 现为高级工程师、无线传输技术高级专家, 主要研究方向为战术通信、军民融合专用移动通信系统设计和无线传输关键技术;

ZHANG Jing was born in Shanghang, Fujian Province, in 1974. He received the B. S. degree from Xidian University in 1996. He is now a senior engineer. His research concerns tactical communication, mobile communication and wireless transmission.

Email: zhangjing_gz@sina.com

余忠洋 (1989—), 男, 安徽六安人, 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室博士研究生, 主要研究方向为编码调制技术、无线传输;

YU Zhongyang was born in Lu'an, Anhui Province, in 1989. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns coding modulation technology and wireless transmission.

Email: 844767740@qq.com

白宝明 (1966—), 男, 山西大同人, 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为编码调制技术、无线通信系统。

BAI Baoming was born in Datong, Shanxi Province, in 1966. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns coding modulation technology and wireless communication system.

Email: bmbai@xidian.edu.cn