

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.014

引用格式:刘洋. 基于离散傅里叶变换的高动态突发信号检测及频率估计[J]. 电讯技术,2016,56(5):557-561. [LIU Yang. Signal detection and frequency estimation of high dynamic burst signals based on discrete Fourier transform[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(5):557-561.]

基于离散傅里叶变换的高动态突发信号检测及频率估计*

刘 洋**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘 要:针对高动态突发通信应用环境,提出了一种新的基于频率域的突发信号检测及载波频偏估计算法,通过一次离散傅里叶变换(DFT)实现突发信号存在性检测及频率估计,并与经典 Power-Law 算法进行了比较。仿真结果表明:在低信噪比条件下,新算法检测信噪比门限改善超过1 dB,频率估计均方根误差小于符号率的1%,并且对载波频偏及信号电平动态不敏感,实现结构简单,适合实时处理及工程应用。

关键词:高动态突发信号;信号检测;离散傅里叶变换;频率估计

中图分类号:TN911 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)05-0557-05

Signal Detection and Frequency Estimation of High Dynamic Burst Signals Based on Discrete Fourier Transform

LIU Yang

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Considering the high dynamic features in burst transmission system, this paper presents a new algorithm of signal detection and frequency estimation based on frequency domain. This algorithm can perform presence detection and frequency estimation through one discrete Fourier transform (DFT) operation of the received signal. Comparisons are made with the Power-Law algorithm. Simulation results prove that the signal-to-noise ratio (SNR) threshold is improved more than 1 dB when SNR is low, the root mean square error (RMSE) of frequency estimation is lower than 1% of the symbol rate, and the probability of detection and accuracy of frequency estimation is influenced little by the variation of power level and frequency offset. It is convenient for real time processing and engineering applications.

Key words: high dynamic burst signal; signal detection; discrete Fourier transform; frequency estimation

1 引 言

高动态平台突发通信系统具有以下特点:一是由于通信平台具有较高运动速度及机动性,接收信号具有高动态特性,即信号电平及载波多普勒频率偏移具有较大动态范围;二是突发信号持续时间短且位置不确定;三是接收信号信噪比较低;四是受设备体积功耗的限制,要求信号处理算法实现复杂度适中。以上特点对突发信号存在性检测及频率估计算法提出了较高的要求。

目前,突发信号常用的存在性检测算法主要有以下几种:一是能量检测算法^[1-2],利用信号短时能量作为待检测特征量,其优点是算法对载波频偏不敏感,实现简单,既可以在基带进行,也可以在数字中频进行,但其突出问题是对噪声比较敏感,不适用于低信噪比条件;二是频域检测算法,如基于循环谱^[3-4]的算法以及基于离散傅里叶变换 (Discrete

* 收稿日期:2016-01-03;修回日期:2016-03-11 Received date:2016-01-03;Revised date:2016-03-11

** 通信作者:liuyang606@sohu.com Corresponding author:liuyang606@sohu.com

• 557 •

Fourier Transform, DFT) 的 Power-Law 算法^[5] 在低信噪比下具有优良性能, 但这类算法的计算复杂度较高, 不利于实时处理; 三是匹配滤波法, 通过计算接收信号与本地确定信号的相关性来实现信号检测, 比较适用于确定性信号或有前导信号的检测, 但这类算法对载波频偏敏感, 判决门限与信号电平有关, 不适合高动态应用场合。

大频偏信号通过匹配滤波器后信噪比会大幅降低, 严重影响符号位同步、突发帧同步等后续处理。大频偏信号的频偏估计应考虑在匹配滤波之前没有位同步辅助的条件下进行, 目标是将频偏校正到 0.1 倍符号速率以内, 为后续处理创造条件。目前频率估计算法研究主要集中在单音信号的高精度估计^[6-7], 需要信号经过位同步、去调制后变换成单音信号进行, 频偏适用范围一般在 $\pm 1/2$ 符号率之间。对于大频偏信号, 工程上通常采用搜索不同频率槽, 通过同步判决反馈的方法实现大频偏估计。在载波频率动态较大时, 由于频率槽的数量可能多达几十个, 搜索时间和实现开销之间存在突出矛盾, 不能有效满足突发通信设备工程实现要求。因此, 对于大频偏突发信号的接收, 在信号匹配滤波前无位同步辅助的条件下, 通过前向结构实现大频偏信号频偏校正是非常具有工程价值的研究方向。

高动态突发信号检测的关键技术在于如何构造一种对信号电平及频偏动态不敏感又能很好地表征信号与噪声差异的特征量; 通过前向结构实现频偏校正的关键技术在于对没有实现位同步的调制信号, 如何构造出能准确表征载波频率的统计量来实现频偏估计。本文从应用角度出发, 构造了一种同时满足以上两方面要求的特征统计量, 给出了计算处理流程, 并在不同频偏及信噪比下进行了大量仿真, 结果表明: 新检测算法与 Power-Law 算法相比较, 在相同信噪比条件下具有更高的检测概率; 新频率估计算法在低信噪比时能够获得远高于应用需要的估计精度。

2 信号模型

突发信号的存在性检测可以表示为一个二元假设检验问题^[8], 用 H_0 假设代表目标信号不存在, 用 H_1 假设代表目标信号存在, 在高斯噪声环境下的接收信号等效复低通表示形式为

$$r(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & H_1 \text{ 成立} \\ n(t), & H_0 \text{ 成立} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n(t)$ 为复高斯白噪声; $s(t)$ 为有用信号, 可以表示为

$$s(t) = [\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g_T(t-nT)] e^{j2\pi f_d t} \quad (2)$$

式中: a_n 为发送的信息符号; T 为发送符号周期; $g_T(t)$ 为基带发送成形滤波器的冲激响应, 在带宽受限的通信系统中, 一般采用平方根升余弦成形滤波器; f_d 为收发载波频偏。在高动态低速通信系统中, 通信平台的高速运动导致收发间存在较大的多普勒频移, 多普勒频偏与符号速率基本在同一量级。

在突发信号物理层帧结构中, 一般在有用数据前加入一段前导码, 以便于接收端实现突发信号功率检测、符号位同步及数据帧同步等处理, 典型的突发数据帧结构如图 1 所示。



图 1 突发传输帧结构
Fig. 1 Frame structure of burst transmission

前导码通常采用具有良好相关性的 PN 序列, 调制方式为 BPSK 调制。本文算法即通过对 BPSK 调制的前导码进行二次功率谱变换来实现突发信号的存在性检测及大频偏估计。

3 算法原理

3.1 基本原理

对于无噪声的 BPSK 调制信号作平方运算, 得到

$$s^2(t) = [\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g_T(t-nT)]^2 e^{j2\pi \cdot 2f_d t} = z(t) e^{j2\pi \cdot 2f_d t} \quad (3)$$

式中:

$$z(t) = [\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g_T(t-nT)]^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_n a_m g_T(t-nT) g_T(t-mT) \quad (4)$$

随机信号 $z(t)$ 可以表示成由一个稳态波 $v(t)$ 和一个交变波分量 $u(t)$ 构成^[9], 则

$$z(t) = v(t) + u(t) \quad (5)$$

对于 BPSK 调制信号, 随机幅度序列 $\{a_n\}$ 各符号之间互不相关, 取值为 $+A$ 或 $-A$, 且等概出现, 则有

$$v(t) = E\{z(t)\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} E(a_n a_m) g_T(t-nT) g_T(t-mT) = A^2 \sum_{m=-\infty}^{\infty} g_T^2(t-mT) \quad (6)$$

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_n a_m g_T(t-nT) g_T(t-mT) \quad (7)$$

由式(6)可以看出 $v(t)$ 是周期为 T 的周期信号。 $v(t)$ 可以展开成傅里叶级数形式:

$$v(t)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}C_me^{j2\pi mf_s t}。 \tag{8}$$

式中: $f_s=1/T$ 。则 $v(t)$ 的傅里叶变换为

$$V(f)=\sum_{m=-\infty}^{\infty}C_m\delta(f-mf_s)。 \tag{9}$$

式中:

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} v(t) e^{-2\pi m f_s t} dt = \\ & \frac{A^2}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_T^2(t-nT) e^{-2\pi m f_s t} dt = \\ & \frac{A^2}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-T_s/2-nT_s}^{T_s/2-nT_s} g_T^2(t) e^{-2\pi m f_s (t+nT_s)} dt \\ & \frac{A^2}{T_s} \int_{-\infty}^{\infty} g_T^2(t) e^{-2\pi m f_s t} dt = \frac{A^2}{T_s} G(mf_s)。 \end{aligned} \tag{10}$$

式中: $G(f)=G_T(f)*G_T(f)$ 。因此,在无频偏条件下,对 BPSK 截短信号作平方运算之后,其频谱在频率 $f=m/T$ 处存在离散谱线,幅度正比于 $|G(f)|$,零频处的幅度最大。当载波频偏为 f_d 时,BPSK 调制信号平方变换后在频率 $2f_d$ 处存在幅度最大的离散谱分量。本文提出的新算法就是通过搜索突发信号前导头平方变换后的最大幅度谱分量实现信号性检测和频偏估计。

3.2 检测特征量构造

对接收信号 $r(t)$ 以采样率 N/T 进行采样,得到离散观测数据 $r(n)$ 。下面介绍信号检测特征量的构造流程。

(1) 对观测数据作平方运算:

$$x(n)=r(n)\cdot r(n)。 \tag{11}$$

(2) 对平方运算后的数据进行 DFT 变换:

$$X_m(k)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(n)w(mh-n)e^{-j2\pi kn/LN}。 \tag{12}$$

式中: $k=0,1,\cdots,LN-1$; $w(n)$ 是长度为 LN 的滑动窗; h 为相邻两组观测数据观测窗向前滑动的采样点数。

(3) 计算第 m 组观测数据的平均功率:

$$p_m=\frac{1}{LN}\sum_{n=-\infty}^{\infty}|x(n)|w(mh-n)。 \tag{13}$$

(4) 搜索 $X_m(k)$ 中最大幅度谱线位置 $k_{\max}$ 。

(5) 得到检测判决函数为

$$T_m(X)=\frac{|X_m(k_{\max})|}{p_m}\begin{cases} >\eta & \text{信号存在} \\ \leq \eta & \text{信号不存在} \end{cases}。 \tag{14}$$

显然,虚警概率 $P_f=P_r\{T_m(X)>\eta|H_0\}$ 相对于门限 η 的概率分布与信号电平无关,说明该检测算法具有恒虚警概率特性。应用中,可以根据虚警概

率的要求选择对应的判决门限,不用考虑输入信号电平的影响。

3.3 频偏估计

由 3.1 节的分析可知,在假设 H_1 成立的条件下, $X_m(k)$ 幅度最大处对应的离散频率为

$$k_{\max}=\left\lceil\frac{2f_d}{N/T}LN\right\rceil=\lceil 2f_dLT\rceil。 \tag{15}$$

式中: $\lceil x\rceil$ 表示取最接近 x 的整数;直接利用 DFT 进行频率粗测的频率为 $\hat{f}_d=k_{\max}/2LT$; DFT 的频率分辨率为 $\Delta f=1/LT$ 。因此,直接利用 DFT 的频率估计算法精度取决于信号测量长度。在突发通信中,前导头的长度十分有限,使 DFT 的频率分辨率和估计精度受到了限制。文献[10]提出了一种 DFT 结合插值的方法来提高单音信号频率估计精度,其插值算法的精度和运算量适合工程应用。将其频率插值算法应用到本文的频率估计算法中,进一步得到频偏估计值为

$$\hat{f}_d=\begin{cases} \left(k_{\max}+\frac{|X_m(k_{\max})|-2|X_m(k_{\max}-1)|}{|X_m(k_{\max})|+|X_m(k_{\max}-1)|}\right)/2LT, & |X_m(k_{\max}-1)|>|X_m(k_{\max}+1)| \\ \left(k_{\max}-\frac{|X_m(k_{\max})|-2|X_m(k_{\max}+1)|}{|X_m(k_{\max})|+|X_m(k_{\max}+1)|}\right)/2LT, & |X_m(k_{\max}-1)|<|X_m(k_{\max}+1)| \end{cases}。 \tag{16}$$

新算法频偏估计范围为 $-N/4T<\hat{f}_d<N/4T$,估计范围与信号过采样倍数有关。当 $N=8$ 时,频率估计范围为 $(-2/T,2/T)$,能够满足大部分频率高动态应用场景需要。当频偏超过 2 倍符号率的情况下,可以通过选择更高过采样倍数 N 来扩展该算法频率估计范围。

4 算法仿真

4.1 检测性能仿真

对复数加性高斯白噪声中的观测数据进行仿真,并将新算法与经典的 Power-Law 算法(简称 PL 算法)检测性能进行比较。根据突发通信系统中常用的信道参数及信噪比范围,设置仿真条件为: $g_r(t)$ 采用滚降系数 0.35 的根升余弦成形函数,采样率为 $8/T$,多普勒频偏 f_d 在 $0\sim 2/T$ 之间随机产生,根据蒙特卡洛原则选择仿真次数 5 000 次。在虚警概率 $P_f<1\%$ 的判决门限下,得到两种算法在不同观测长度 L 下的检测概率 $P_d=P_r\{T_m(X)>\eta|H_1\}$ 与信噪比关系如图 2 所示。

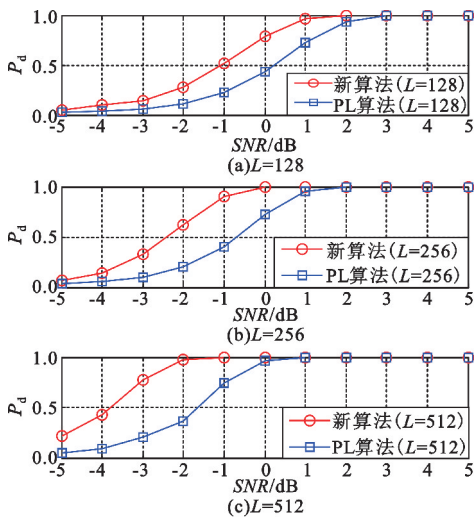


图2 检测概率与信噪比的关系曲线

Fig.2 Probability of detection versus SNR

从图2中可以看出:在信噪比较高时,两种算法均能获得较高的检测概率;在信噪比较低时,比较两者相同检测概率对应的信噪比门限值,新算法比Power-Law算法有1 dB以上的改善,并且观测长度越长,改善越明显,在观测长度 $L=512$ 时,新算法比Power-Law算法信噪比门限改善达到2 dB。

图3给出了新算法在不同观测长度下检测概率曲线。随着观测长度的增加,检测性能随之提高。检测长度增加1倍,相同检测概率对应的信噪比门限降低1.5 dB左右。在工程应用中,可以根据系统的门限信噪比及检测概率的具体要求通过仿真来确定检测观测数据长度。

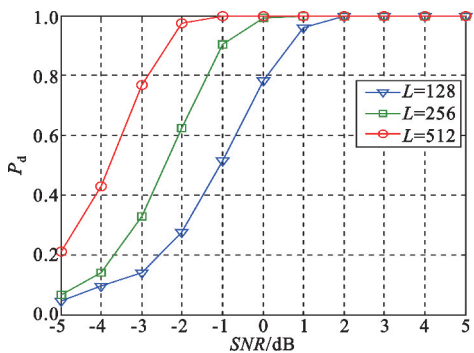


图3 不同观测长度下检测概率

Fig.3 Probability of detection versus SNR under different data length

4.2 频偏估计性能仿真

在数据通信中,一般要求突发信号正确检测概率优于99.9%。根据4.1节仿真结果,观测长度 L 分别为128、256、512时,检测概率99.9%对应的信噪比分别为3 dB、1.5 dB、0 dB。为了验证在DFT最小分辨率内不同频率的算法估计精度,设置仿真

载波频偏为 $f_d = (L + \delta) \Delta f$, δ 为在区间 $[0, 0.5]$ 均匀分布的6个频率点,其余仿真条件与4.1节相同。对每个频率点进行5 000次仿真,采用归一化频率估计均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE) $\delta_f T$ 来衡量算法的频偏估计性能。表1给出了在DFT频率分辨率内不同频点上频率估计均方根误差值。

表1 频率估计仿真结果

Tab.1 Simulation result of frequency estimation

δ	RMSE		
	$L=128$	$L=256$	$L=512$
0.0	$4.763\ 2 \times 10^{-4}$	$2.107\ 4 \times 10^{-4}$	$9.338\ 8 \times 10^{-5}$
0.1	$4.244\ 6 \times 10^{-4}$	$1.831\ 1 \times 10^{-4}$	$8.018\ 1 \times 10^{-5}$
0.2	$3.584\ 4 \times 10^{-4}$	$1.561\ 2 \times 10^{-4}$	$7.024\ 5 \times 10^{-5}$
0.3	$3.564\ 4 \times 10^{-4}$	$1.563\ 0 \times 10^{-4}$	$6.814\ 3 \times 10^{-5}$
0.4	$4.205\ 6 \times 10^{-4}$	$1.828\ 4 \times 10^{-4}$	$7.982\ 8 \times 10^{-5}$
0.5	$4.704\ 1 \times 10^{-4}$	$2.062\ 8 \times 10^{-4}$	$9.341\ 0 \times 10^{-5}$

由表1的仿真结果可以看出:在检测概率优于99.9%的信噪比门限下,不同观测长度时的频率估计均方根误差均在1‰符号速率以下;当信号频偏在DFT频率分辨率内变化时,经过内插处理之后频偏估计精度无明显变化,有效克服了DFT运算“栅栏效应”给频率估计精度带来的不利影响;观测长度每增加1倍,估计误差降低一半左右。仿真结果表明新的频率估计算法可以在信号无位同步辅助下实现频偏高精度估计。

新的频率估计算法与文献[6–7]及文献[10]中基于单音信号的频率估计算法的主要区别在于:

(1) 新算法直接对匹配滤波前的接收信号进行处理实现频率估计,后者一般需要信号先完成位同步并变换成单音信号才能应用;

(2) 新算法频率估计范围通常为 $(-2/T, 2/T)$ (工程应用中通常 N 取8),后者的频率估计范围为 $(-1/2T, 1/2T)$,新算法的估计范围达到后者4倍,甚至更高;

(3) 新算法平方运算后信号中存在交变波分量,对频率估计来说是一种自噪声干扰,同时平方运算也会带来信噪比的损失。在相同观测长度下,基于单音信号的频率估计算法估计精度一般要优于新算法。在采用新算法完成同步处理以后,如果对频率精度有更高的要求,可以再利用文献[10]中的类似算法来提高估计精度。实际上,新算法的估计精度已经能够满足目前大部分解调同步算法对频偏精度的要求。

5 算法复杂度分析

新算法的主要运算量集中在式(11)平方变换

和式(12)DFT 变换中的复数乘法运算,与其相比其余运算量可以忽略不计。平方变换需要 LN 次复数乘法运算,DFT 运算可以通过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)实现,进行长度 LN 的 FFT 变换需要 $(LN/2)\lg(LN)$ 次复数乘法运算,新算法总的需要 $LN(\lg(LN)/2+1)$ 次运算。计算过程中的求模运算建议采用 CORDIC 算法,实现简单且精度高。Power-Law 检测算法需要 $LN(\lg(LN)/2+5)$ 次复数乘法运算。在 $N=8, L$ 分别为 128、256、512 时,新算法的运算量仅为 Power-Law 检测算法的 60% 左右。

同时,新算法在完成信号检测后以增加极小运算量为代价实现频偏估计,使大频偏信号能够采用前馈结构进行高精度频偏校正。相比目前广泛采用判决反馈法进行大频偏粗估计,位同步后再进行频率精估计的处理方式,新算法不需要在大量频率槽内依次搜索判决,还可省去二次频率精估计操作,不仅运算量明显降低,处理控制流程也得到简化。

目前,FFT 运算和 CORDIC 算法在 FPGA 中可以直接调用 IP 核,在 DSP 芯片中通常也对其有专门的优化处理,使得新算法易于硬件实现和对信号进行实时处理。以 FPGA 应用为例,当 $L=256$ 时,完成对一组观测数据的处理大约需要 5 000 个时钟周期,在 100 MHz 的驱动时钟下仅需要 50 μs ,能够满足大部分应用场合对实时性处理的要求。

6 结束语

本文提出了一种高动态突发信号存在性检测及大频偏估计算法,分析表明新算法具有以下优点:

(1)检测算法具有恒虚警特性,算法性能不受信号电平及频偏值影响,适合高电平及频率动态的通信应用场景;

(2)频偏估计算法可通过前馈结构实现大频偏信号的高精度频偏校正,频偏估计范围可以根据需求灵活调整;

(3)通过一次 DFT 变换同时完成信号检测及频率估计,运算复杂度低,适合实时处理。

新算法已在某型 UHF 频段机载通信系统中得到应用。实测结果显示:在 $L=256$ 、符号速率 8 ksymbol/s、频偏范围 $(-2\text{ kHz}, 2\text{ kHz})$ 、最大多普勒频率变化率 220 Hz/s、信噪比为 2 dB 的条件下,突发信号正确检测概率优于 99.9%,频偏估计误差小于符号率的 1%,满足系统设计要求。

同时,仿真分析及实际测试中发现,当存在较大多普勒频率变化率时,算法仍然适用,但其性能会随着变化率的增加逐渐下降。下一步将重点研究几种

典型频偏变化率模型下算法性能与频偏变化率之间的关系,以更有效地支撑工程应用。

参考文献:

- [1] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4): 523-531.
- [2] 隋丹,葛临东,屈丹. 一种新的基于能量检测的突发信号存在性检算法[J]. 信号处理, 2008, 24(4): 614-617.
SUI Dan, GE Lindong, QU Dan. A novel presence detection algorithm based on the energy detection for burst signals[J]. Signal Processing, 2008, 24(4): 614-617. (in Chinese)
- [3] BAUGH K W, HARDWICKE K R. On the detection of transient signals using spectral correlation[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 1994, 13(4): 467-479.
- [4] 林祎,彭华,王彬,等. 一种基于循环谱的突发信号盲检测算法[J]. 信号处理, 2011, 27(12): 1920-1924.
LIN Yi, PENG Hua, WANG Bin, et al. A blind detection algorithm of burst signal based on cyclic spectrum[J]. Signal Processing, 2011, 27(12): 1920-1924. (in Chinese)
- [5] WANG Z, WILLETT P K. All-purpose and plug-in power-law detectors for transient signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(11): 2454-2466.
- [6] QUINN B G. Estimating frequency by interpolation using Fourier coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(5): 1264-1268.
- [7] 张昌菊,唐斌. 单频信号快速频率估计算法比较及改进[J]. 电讯技术, 2005, 45(1): 72-76.
ZHANG Changju, TANG Bin. Comparison and modification of frequency estimation algorithms for single sinusoid signal[J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(1): 72-76. (in Chinese)
- [8] 吴迪,葛临东,王彬. 短波突发信号盲检测算法的对比研究[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 111-116.
WU Di, GE Lindong, WANG Bin. Comparative research on blind detection algorithm of HF burst signal[J]. Journal on Communications, 2010, 31(8): 111-116. (in Chinese)
- [9] 樊昌信,张甫翊,徐炳祥. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2001: 91-93.
FAN Changxin, ZHANGFU Yi, XU Bingxiang. Communication principles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 91-93. (in Chinese)
- [10] 贾平生. 一种适用于多相相干解调的载波同步方法[J]. 电讯技术, 2001, 41(5): 70-72.
JIA Pingsheng. A carrier synchronization method applied to poly-phase coherent demodulation communication[J]. Telecommunication Engineering, 2001, 41(5): 70-72. (in Chinese)

作者简介:



刘洋(1982—),男,辽宁法库人,2009 年于电子科技大学获通信与信息系统专业硕士学位,现为工程师,主要研究方向为无线通信技术及其信号处理。

LIU Yang was born in Faku, Liaoning Province, in 1982. He received the M. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. He is now an engineer. His research concerns wireless communications and signal processing.

Email: liuyang606@sohu.com