

适用于高阶 QAM 的改进型 Costas 环研究

周胜源, 潘惠兰

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为提高高阶正交幅度调制(QAM)解调中载波恢复的收敛速度及跟踪稳定性,基于软件无线电设计思路 and 传统科斯塔斯(Costas)环基本原理,提出一种改进型 Costas 环的研究方法。该方法采用符号鉴相器代替传统的乘法器鉴相器,设计的环路滤波器运用多系数调整取代传统的一组系数调整。以 1024QAM 信号解调为例,通过使用 Matlab/Simulink 下的 System Generator 工具箱对解调系统建模仿真,以验证其载波恢复性能。仿真结果表明,改进的 Costas 环能准确地对接收的高阶 QAM 信号进行载波恢复,且与传统算法相比,改进后的环路跟踪平稳、收敛速度更快速、误码率更低,较好地改善了通信质量。

关键词: 载波同步;科斯塔斯环;高阶正交幅度调制;System Generator 仿真;环路滤波器

中文引用格式:周胜源,潘惠兰. 适用于高阶 QAM 的改进型 Costas 环研究[J]. 计算机工程,2017,43(3):110-114.

英文引用格式:Zhou Shengyuan, Pan Huilan. Research on Improved Costas Loop for High-order QAM[J]. Computer Engineering,2017,43(3):110-114.

Research on Improved Costas Loop for High-order QAM

ZHOU Shengyuan, PAN Huilan

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

[Abstract] In order to improve convergence speed and tracking stability for high-order Quadrature Amplitude Modulation(QAM) demodulation carrier recovery, a new kind of Costas loop is designed based on software radio thought and the basic principle of traditional Costas loop. It is designed with sign phase detector instead of the traditional multiplier, and multi-factor adjustment replaces a set of coefficients in loop filter. Carrier recovery performance is verified by modeling and simulation using System Generator toolbox under Matlab/Simulink software for 1024QAM demodulation. Simulation result shows that the improved Costas loop can recover the carrier from received signal accurately for high-order QAM, with stable tracking, faster convergence, and lower bit error rate compared with traditional one, which improves the communication quality.

[Key words] carrier synchronization; Costas loop; high-order Quadrature Amplitude Modulation (QAM); System Generator simulation; loop filter

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2017.03.020

0 概述

正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)是多进制与正交载波相结合的技术,同时根据载波幅度和相位传递信息比特,充分利用整个信号平面,具有高效的频带利用率^[1]。目前,高阶 QAM 调制技术已广泛应用于中、大容量数字微波通信、移动通信、水声通信、卫星通信等领域。在通信系统设计中,相干解调比非相干解调具有更好的功率效率^[2],而对于相干解调技术,载波同步是正确解调的前提。特别是对于高阶

QAM,它作为一种充分利用了载波相位信号的调制解调方式,对载波偏移非常敏感,因此载波恢复技术在高阶 QAM 的解调中显得尤为重要^[3]。国内外对载波同步技术已进行了一系列的研究。文献[4-5]证明了跟踪低信噪比的抑制载波信号的最佳方式是科斯塔斯(Costas)环和平方环,且这 2 种环路等效,但是 Costas 环利用乘法器和滤波器代替平方环的平方器,环路的电路制作和调试更简单。所以,Costas 环的运用更广泛。在传统 Costas 环基础上,文献[6]将 Costas 环与多相滤波器结合,提出一种并行结构,有效降低了环路滤波器

基金项目:广西壮族自治区教育厅科研项目“QAM-FM 复合调制研究”(201203YB084)。

作者简介:周胜源(1974—),男,教授,主研方向为无线通信、宽带通信网络、软件无线电;潘惠兰,硕士研究生。

收稿日期:2016-03-02 **修回日期:**2016-04-07 **E-mail:**1064505603@qq.com

的工作频率。文献[7]采用逻辑控制模块代替直接数字合成器的方法实现 Costas 环,有效节省了逻辑资源。

可见,如何在保证正确提取有效载波同步分量的前提下,尽可能地提高环路效率、鉴相精度以及节省硬件资源已成为当前研究的重点。本文分析了传统 Costas 环基本原理,在此基础上,结合软件无线电设计思想,对鉴相器和环路滤波器进行改进,并从理论上进行分析。最后以 1024QAM 信号解调为例,利用 Xilinx 下的 System Generator 工具箱对整个系统建模,通过仿真验证改进型 Costas 环的性能。

1 Costas 环基本原理

1.1 传统 Costas 环

如图 1 所示为传统的 Costas 环基本原理框图^[8]。在环路中,输入的已调信号分成两路,分别与压控振荡器(VCO)所产生的正交载波相乘,再通过低通滤波器滤除高频分量,所得到的携带信息的路信号相乘鉴相,经环路滤波器后控制 VCO,调整相位使相位差减小到很小的值,从而实现同步。

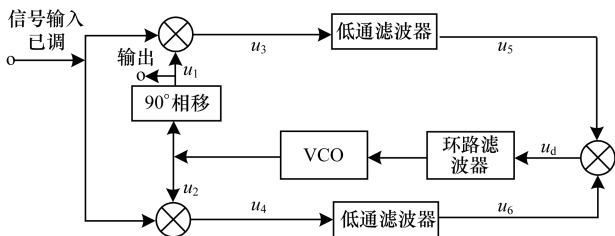


图 1 传统 Costas 环原理框图

设发送端 QAM 信号为^[9]：

$$s(t) = X(t) \cos(2\pi f_c t) - Y(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

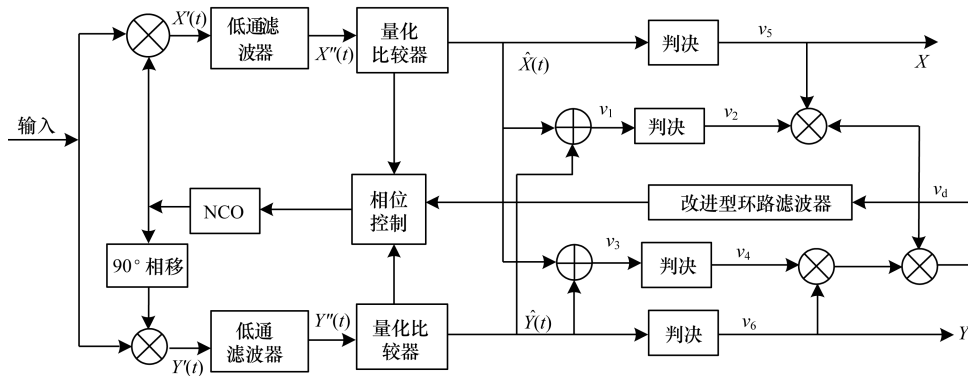


图 2 改进型 Costas 环原理框图

1.2.1 鉴相器

改进的鉴相器参考文献[10],其取代了传统的乘法器鉴相器,框图如图 2 所示。输入环路的 QAM 信号 $r(t)$ (式(2))与载波相乘,再通过低通滤波器滤除高频分量后,得到信号:

$$\begin{cases} X''(t) = X(t) \sin\theta + Y(t) \cos\theta \\ Y''(t) = X(t) \cos\theta - Y(t) \sin\theta \end{cases} \quad (6)$$

假定通过信道后信号所产生的相位误差为 φ , 则接收到的 QAM 信号为:

$$r(t) = X(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi) - Y(t) \sin(2\pi f_c t + \varphi) \quad (2)$$

其中, $X(t), Y(t)$ 为信号幅度; f_c 为频率。

设 VCO 输出信号与输入已调信号载波间的相位差为 φ , 假定环路锁定, 则本地振荡器所产生的两路正交载波分别为:

$$u_1 = \cos(2\pi f_c t + \varphi), u_2 = \sin(2\pi f_c t + \varphi) \quad (3)$$

信号 $r(t)$ 分别与 u_1, u_2 相乘后再经过低通滤波器, 分别产生同相分量和正交分量:

$$\begin{cases} u_5 = \frac{1}{2}X(t) \cos(\phi - \varphi) + \frac{1}{2}Y(t) \sin(\phi - \varphi) \\ u_6 = \frac{1}{2}Y(t) \cos(\phi - \varphi) - \frac{1}{2}X(t) \sin(\phi - \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

u_5, u_6 相乘后产生的误差信号为:

$$u_d = \frac{1}{4}X(t)Y(t) \cos[2(\phi - \varphi)] - \frac{1}{8}[X(t)^2 - Y(t)^2] \sin[2(\phi - \varphi)] \quad (5)$$

从推导过程可知, 当载波相位差 $(\phi - \varphi)$ 为 0 时, 可以实现正确解调, 此时, VCO 的输出 u_1 就是所需的同步载波。而相位差存在, 同相和正交信号就会互相干扰, 引起性能下降, 不能正确解调。

1.2 改进型 Costas 环

本文提出的 Costas 环对鉴相器和环路滤波器进行改进, 改进后的原理框图如图 2 所示。

其中, 为发送端载波和本地载波之间由于频率、相位偏移产生的相位差。图中加法器的输出为:

$$\begin{cases} v_1 = X(t) [\sin\theta + \cos\theta] + Y(t) [\cos\theta - \sin\theta] \\ v_3 = X(t) [\sin\theta - \cos\theta] + Y(t) [\cos\theta + \sin\theta] \end{cases} \quad (7)$$

鉴相后得到的误差信号为:

$$v_d = \text{sgn}(v_5 \cdot v_6 \cdot v_2 \cdot v_4) = \text{sgn}[\hat{X}(t) \cdot \hat{Y}(t) \cdot v_1 \cdot v_3] \quad (8)$$

$$\begin{cases} \hat{X}(t) \cdot \hat{Y}(t) = \sin\theta\cos\theta[X^2(t) - Y^2(t)] \\ \quad - X(t)Y(t)[\sin^2\theta - \cos^2\theta] \\ v_1 \cdot v_3 = [X^2(t) - Y^2(t)]\sin^2\theta \\ \quad - [X^2(t) - Y^2(t)]\cos^2\theta + 4X(t)Y(t)\sin\theta\cos\theta \end{cases} \quad (9)$$

其中, $X(t), Y(t)$ 为解调输出的两路基带信号; $\hat{X}(t), \hat{Y}(t)$ 分别为它们对应的最大似然估计值。从式(9)可以看出, 只要两路信号幅度满足 $|X(t)| = |Y(t)|$, 则误差信号可化简为:

$$v_d = \text{sgn}[X^2(t)Y^2(t)\sin 4\theta] = \text{sgn}[\sin 4\theta] \quad (10)$$

如果信号幅度满足 $|X(t)| = |Y(t)|$, 那么该算法产生的误差信号仅与相位差有关, 数字调制信号已被消除。误差信号经环路滤波器后, 进入 NCO, 调整本地载波与发送端载波, 从而实现同步。文献[10]已证明了该方法比传统 Costas 环运算效率更高。

1.2.2 环路滤波器

环路滤波器不仅要对接相器输出信号滤波, 而且对锁相环建立反馈环路动态特性, 保证锁相环在系统由于瞬时噪声失锁时能快速重新捕获信号^[11]。本文系统采用难度适宜、能够实现稳态的有源二阶环^[12]。改进型环路滤波器采用多系数调整环路反馈信号的方法, 其原理框图如图3所示。

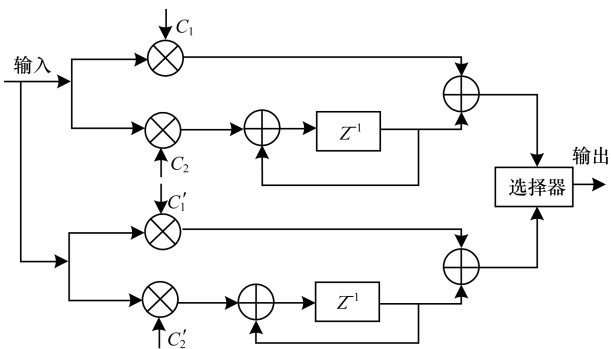


图3 改进型环路滤波器原理框图

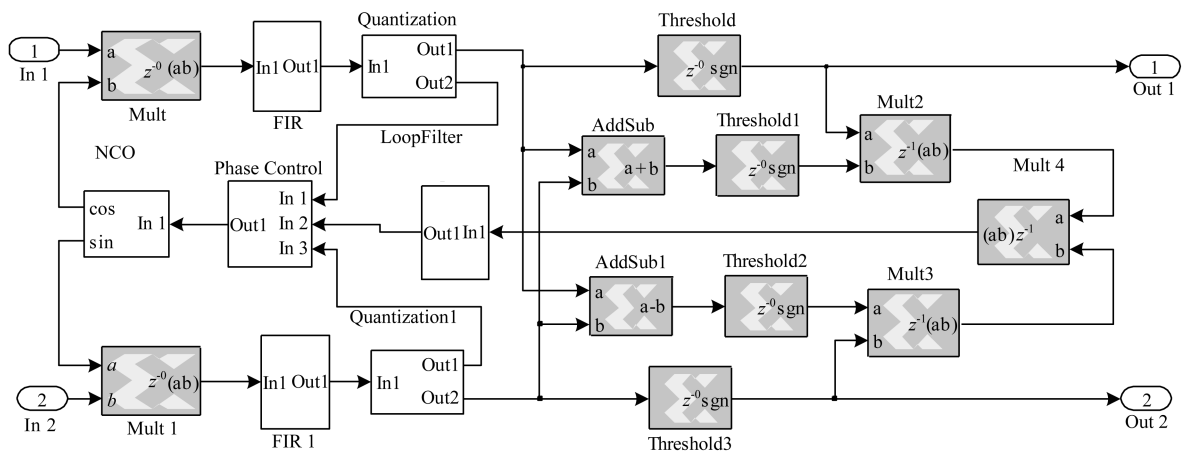


图4 改进的载波同步仿真模型

在二阶数字环路滤波器结构中, C_1 为调整相偏的比例常数; C_2 为调整频偏的积分常数。通过调整这2个常数, 可以改变环路捕捉带、收敛时间、抖动等特性, 进而使锁相环满足捕获与跟踪要求^[13]。改进型环路滤波器采用2组系数 (C_1, C_2 和 C_1', C_2') 代替了传统环路的一组系数 (C_1, C_2)。

滤波器系数 C_1, C_2 计算方法如下:

$$C_1 = \frac{2\varepsilon\omega_n T}{K_d}, C_2 = \frac{(\omega_n T)^2}{K_d} \quad (11)$$

其中, ε 是锁相环的阻尼系数; ω_n 为环路阻尼振荡角频率; T 为时间周期; K_d 为环路增益。而另一组系数取为小系数, 计算方法如下:

$$C_1' = \frac{1}{10}C_1, C_2' = \frac{1}{10}C_2 \quad (12)$$

改进后的系统根据环路的反馈信号大小调整系数, 当一开始反馈值较大时, 系统为大系数, 使其快速收敛; 当反馈值较小时, 系统为小系数, 使其平稳跟踪。

2 改进型 Costas 环的模型实现

System Generator 是 Matlab/Simulink 环境下的工具箱, 基于模型的系统设计可以图形化操作, 其简单灵活、设计周期短, 且能自动生成硬件实现所需的描述语言代码, 是数字信号处理系统设计与 Xilinx FPGA 实现之间的“桥梁”^[14]。本文系统基带码率取 2.048 Mbit/s, 载波频率为 1.024 MHz, 系统频率是 32.768 MHz, 基于 System Generator 的 1024QAM 改进型载波同步环路的模型实现如图4所示。

为了使低通滤波器输出的信号满足 $|X(t)| = |Y(t)|$, 采用量化比较器对信号进行量化, 并进行取绝对值运算。在环路跟踪过程中会出现频偏、时偏, 为抑制这种突发情况, 在鉴相后增加一个平滑器, 即对式(10)进行平滑拟合。平滑器由平滑模块和滤波器模块构成, 从而得到较为平滑的误差信号。

系统的环路滤波器采用两组系数代替了传统的一组系数。工程上一般取 $\varepsilon = 0.707$, 根据式(11)、式(12)计算,同时考虑环路带宽和工作稳定性,适当调试后得到环路滤波器两组系数的取值

分别为:

- 1) 0.002 014 160 156, 0.000 488 281 45。
- 2) 0.000 201 416 015 6, 0.000 048 828 145。

其仿真模型如图 5 所示。

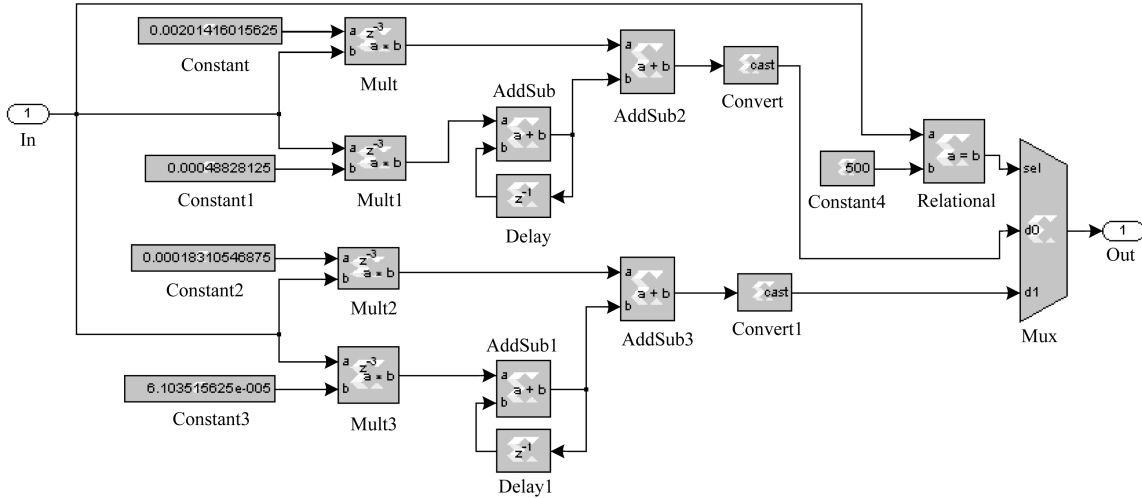


图 5 改进型环路滤波器仿真模型

3 仿真结果与分析

为对比利用传统 Costas 环和改进型 Costas 环的系统性能,分别对 2 个系统建模仿真。假定系统仿真在信噪比 5 dB、码元总数为 100 000 的环境下进行。图 6(a)、图 6(b)分别为采用传统 Costas 环和采用本文提出的改进型 Costas 环时,环路滤波器的输出,它描述了从载波捕获到稳定跟踪的过程。

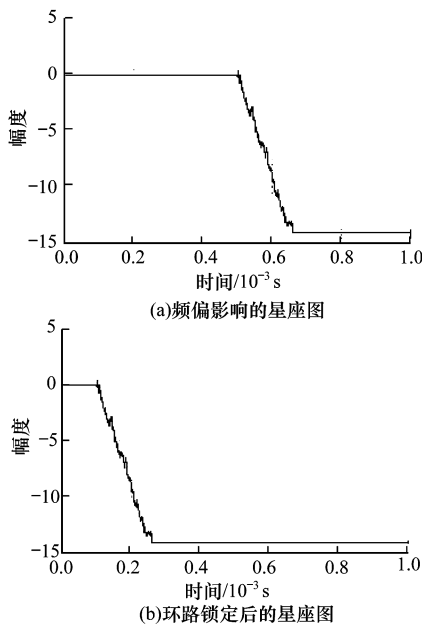


图 6 载波同步中环路滤波器的输出

从图中可看出,改进型 Costas 环在 0.28 ms 时,环路滤波器输出开始稳定,且最终保持在一个固定

值,进入同步状态;而传统 Costas 环收敛的时间比改进的更长。证明了采用改进 Costas 环的算法后环路收敛更快,跟踪稳定。

图 7 所示为采用改进算法对载波信号加 100 Hz 的频偏后系统的不同阶段星座图。其中图 7(a)所示的星座图由于受到信道噪声和载波频偏影响,星座点发散模糊。图 7(b)所示给出了采用改进环路算法所得的星座图,星座图清晰、准确收敛在 1 024 个星座点,表明环路锁定之后,系统已经实现同步,可以正确解调。

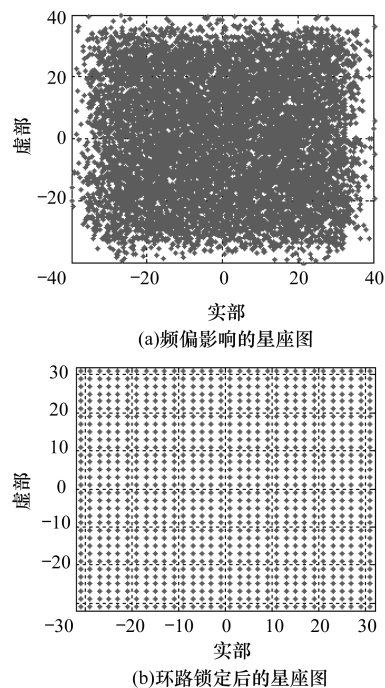


图 7 采用改进算法的 1024QAM 系统星座图

为进一步验证载波恢复性能,本文对传统 Costas 环和改进型 Costas 环的误码率进行对比分析。图 8 所示为高斯信道不同信噪比条件下 2 种算法的系统误码率曲线对比。由图 8 可知,当信噪比较小(≤ 2 dB)时,2 种算法的误码率接近;当信噪比逐渐加大时,误码率不断降低,且改进型 Costas 环误码率比传统的更小。表明改进后系统性能更好。

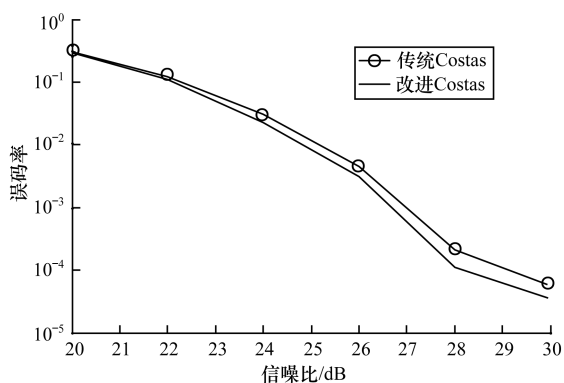


图 8 系统误码率比较

4 结束语

本文结合软件无线电思想及 Costas 环工作原理,提出一种基于 Costas 环的适合高阶 QAM 的载波同步算法。该算法主要设计思路是:在传统 Costas 环算法基础上,通过采用符号鉴相代替传统的乘法鉴相来改进鉴相器;用 2 组环路系数代替一组系数调整来改进环路滤波器。同时,以 1024QAM 解调为例,采用可灵活编程、开发周期短的 System Generator 对所设计系统进行建模仿真。实验结果表明,改进的 Costas 环能有效地实现频率的锁定,可在频差 100 Hz 内恢复载波信号,相对于传统 Costas 环,其收敛速度更快,跟踪也更平稳,且误码率更低,通信质量得到了改善;用 System Generator 建模,算法可移植性强,在很大程度上节省了系统资源。为

进一步提升改进型 Costas 环的性能,今后将重点研究如何使环路同步建立时间更短、相位误差更小。

参考文献

- [1] 姜宇柏,游思晴. 软件无线电原理与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 翁萍. 基于软件无线电的卫星地面测控检测技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [3] 晏飞,吴建辉,黄伟. 一种适合高阶 QAM 的快速载波恢复电路[J]. 电视技术,2006(8):32-35.
- [4] Riter S. An Optimum Phase Reference Detector for Fully Modulated Phase-shift Keyed Signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1969,5(4):627-631.
- [5] Holmes J K. Coherent Spread Spectrum Systems[M]. New York, USA: Wiley-Interscience, 1982.
- [6] 张教镭. 一种适合高速数字通信的并行 Costas 环结构[J]. 电讯技术,2007,47(6):145-147.
- [7] 付连庆,杨力生,王韬,等. 改进的数字 Costas 环设计与实现[J]. 计算机工程,2011,37(17):230-232.
- [8] Simon M K, Lindsey W C. Optimum Performance of Suppressed Carrier Receivers with Costas Loop Tracking[J]. IEEE Transactions on Communications, 1977, 25(2):215-227.
- [9] 王春林. QAM 解调芯片中载波恢复的设计与实现[D]. 南京:东南大学,2006.
- [10] 刘志,吴利民,邹晓清,等. 一种用于实现载波同步的改进 Costas 环研究[J]. 空军雷达学院学报,2007, 21(2):132-134.
- [11] Lindsey W C, Tu K. Phase Noise Effects on Space Shuttle Communications Link Performance[J]. IEEE Transactions on Communications, 1978, 26(11):1532-1541.
- [12] 谢锡海,姜晖. 高动态条件下 BPSK 信号载波的同步算法[J]. 测控技术,2015,34(1):146-149.
- [13] 林竹. 基于软件无线电的通用位同步器研究与实现[D]. 北京:北京化工大学,2013.
- [14] 纪志成,高春能. FPGA 数字信号处理设计教程——System Generator 入门与提高[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [15] 周新力,龚岳洲,孙小东,等. 一种低复杂度的频偏估计算法[J]. 计算机工程,2013,39(3):128-131.

编辑 索书志

(上接第 109 页)

- [9] Leila G, la Najjar A, Hichem B. Selective Hybrid RSS_AOA Approximate Maximum Likelihood Mobile Intra Cell Localization[C]//Proceedings of the 19th European Conference on European Wireless. Berlin, Germany: Springer, 2013:1-6.
- [10] Mallat A, Louveaux J, Vandendorpe L. UWB Based Positioning in Multipath Channels: CRBs for AOA and for Hybrid TOA-AOA Based Methods[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2007: 5775-5780.
- [11] 赵志超,刘义,肖顺平. 多雷达定位的动态加权融合算法及其精度分析[J]. 光电与控制,2010,17(5):35-37.
- [12] 唐小明,朱洪伟,何友,等. 系统误差对 GDOP 的影响分析[J]. 计算机与数字工程,2013,41(6):901-903.
- [13] 张政超,童力. 四站时差无源定位精度分析[J]. 中国电子科学研究院学报,2011,5(6):582-585.
- [14] 金良安,迟卫,郭东田. 基于最优线性数据融合的探潜定位优化算法研究[J]. 系统仿真学报,2014, 26(1):101-106.
- [15] 曹晋龙,王星,程嗣怡,等. 基于 TDOA 和 AOA 的双基地雷达定位方法[J]. 火力与指挥控制,2015, 40(11):10-12.

编辑 陆燕菲