

基于最大似然估计的高动态 GPS 载波跟踪环

向 洋,胡修林

(华中科技大学电子与信息工程系,湖北武汉 430074)

摘 要: 基于最大似然估计提出了一种全新设计的 GPS 载波跟踪环结构,并将该环路应用于高动态、低信噪比条件下的 GPS 载波频率跟踪.文中给出了环路的设计细节,并详细讨论了环路中各模块的功能及模块之间的参数传递.利用具有典型高动态参数的 GPS 载波信号对环路的跟踪性能进行了测试.测试结果表明,与普通 GPS 接收机的载波跟踪环相比,该环路对高动态环境下的失锁门限和门限附近的频率跟踪精度均有显著改善.

关键词: 最大似然估计;高动态 GPS;载波跟踪

中图分类号: TN850.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 07-1563-05

Maximum Likelihood Estimation Based High Dynamic GPS Carrier Tracking Loop

XIANG Yang, HU Xiu-lin

(Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A new structure of GPS carrier tracking loop is proposed based on maximum likelihood estimation. The loop is used for tracking GPS carrier frequency under the circumstance of high dynamic and low signal-to-noise ratio. Details of the loop are presented in this paper, and the functions of all the blocks in the loop as well as parameter transmission among the blocks are discussed. Performance of the loop is tested using GPS carrier signals with typical high dynamic parameters. Results of the tests indicate that the designed loop greatly improves the loss-of-lock threshold and frequency tracking precision near the threshold compared with the ones in common GPS receivers.

Key words: maximum likelihood estimation; high dynamic GPS; carrier tracking

1 引言

全球定位系统(global positioning system, GPS)是美国建立的高精度全球卫星定位导航系统.按照 GPS 接收机载体的动态,可将其应用环境分为静态、中低动态和高动态三种.在不采用惯导速率辅助的情况下(惯导和 GPS 的组合导航系统结构复杂且造价昂贵),为了利用该系统实现对导弹、卫星、飞机等高动态载体的实时定位与导航,必须研制 GPS 信号的高动态接收机.在高动态环境下,接收机载体和卫星之间相对很高的运动速度、加速度和加加速度会在接收信号载频上引起很大的 Doppler 频移及其一阶和二阶导数.此时,若采用普通的 GPS 接收机,则必须增大其载波跟踪环的噪声带宽以捕获和跟踪上宽带的 Doppler 信号.然而,环路噪声带宽的增加必然导致宽带噪声的窜入,使载波跟踪精度大大降低,特别是当接收机处于低信噪比工作状态时,噪声电平会超过环路的工作门限而导致载波跟踪失锁,随后接收机的码跟踪环也会失去锁定.因此,高动态、低信噪比

条件下的载波跟踪问题是高动态接收机研究的关键也是难点所在.

针对上述问题,国内外学者进行了大量的研究工作^[1~3],其中最受关注的方法是将一些信号参数的估计技术引入高动态 GPS 信号跟踪,如最大似然估计(maximum likelihood estimation, MLE)和扩展 Kalman 滤波(extended Kalman filtering, EKF)等.这些参数估计技术理论上虽然都能够在低信噪比时精确估计出高动态信号的 Doppler 参数,但无法直接用于接收信号的实时跟踪与解调.为此,必须针对不同的信号参数估计技术设计闭环结构,对接收信号采取闭环跟踪的方式.本文基于 MLE 方法提出了一种高动态 GPS 载波跟踪环的设计方案,环路的性能测试结果证明了该环路设计理论的正确性以及在高动态环境下跟踪性能的优越性.

2 基于 MLE 的高动态 GPS 载波跟踪环

基于 MLE 的高动态 GPS 载波跟踪环的原理框图

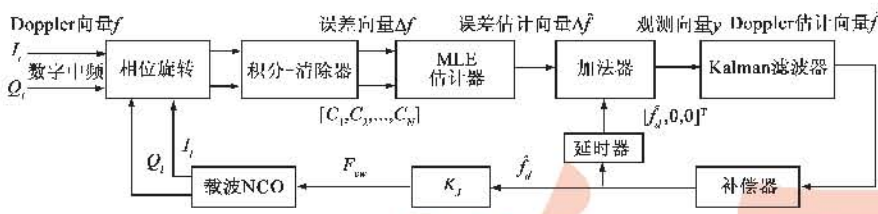


图1 基于MLE的高动态GPS载波跟踪环原理框图

如图1所示. 设环路的输入信号为混有热噪声的两路正交数字中频载波信号

$$I_i(k) = A \cos[2\pi(f_{IF} + f_d)kT_s + \Phi_0] + n_I(k) \quad (1)$$

$$Q_i(k) = A \sin[2\pi(f_{IF} + f_d)kT_s + \Phi_0] + n_Q(k) \quad (2)$$

其中 k 表示离散时间, A 为信号幅度, T_s 为采样时间间隔, Φ_0 为信号初相, n_I 和 n_Q 是单边谱密度为 N_0 的零均值 Gauss 白噪声过程, 噪声方差为 $N_0/(2T_s)$. f_{IF} 表示信号中频, f_d 表示接收机载体与卫星之间的相对高动态运动在接收信号载频上引起的时变 Doppler 频移, 将其对应的频率参数记为向量形式

$$f = [f_0 \ f_1 \ f_2]^T \quad (3)$$

其中 f_0 表示信号的 Doppler 频率常数, 单位为 Hz; f_1 表示信号 Doppler 频率的一阶导数, 单位为 Hz/s; f_2 表示信号 Doppler 频率的二阶导数, 单位为 Hz/s².

两路正交的本地数字载波信号由载波数控振荡器 (numerical controlling oscillator, NCO) 产生, 可分别表示为 (设初相为 0)

$$I_i(k) = \cos[2\pi(f_{IF} + \hat{f}_d)kT_s] \quad (4)$$

$$Q_i(k) = \sin[2\pi(f_{IF} + \hat{f}_d)kT_s] \quad (5)$$

载波 NCO 的固有振荡频率为输入信号中频 f_{IF} , \hat{f}_d 表示环路对输入信号 Doppler 频移 f_d 的估计, 将其对应的频率参数也记为向量形式

$$\hat{f} = [\hat{f}_0 \ \hat{f}_1 \ \hat{f}_2]^T \quad (6)$$

向量 \hat{f} 是对环路输入信号 Doppler 频率参数向量 f 的估计.

环路的输入信号和本地信号经过相位旋转^[4]和积分-消除器^[5]处理后, 得到两路正交的跟踪误差信号 I_Δ 和 Q_Δ , 可表示为

$$I_\Delta(i) = A \cos(2\pi\Delta f_d i T_p + \theta_0) + n_I(i) \quad (7)$$

$$Q_\Delta(i) = A \sin(2\pi\Delta f_d i T_p + \theta_0) + n_Q(i) \quad (8)$$

其中 i 表示离散时间, T_p 为环路的预积分时间, θ_0 为积分信号的初始相位, n_I 和 n_Q 表示积分后的热噪声过程, 此时的噪声方差为 $N_0/(2T_p)$. Δf_d 表示环路的频率跟踪误差, 即

$$\Delta f_d = f_d - \hat{f}_d \quad (9)$$

其对应的频率参数向量可表示为

$$\Delta f = f - \hat{f} = [\Delta f_0 \ \Delta f_1 \ \Delta f_2]^T \quad (10)$$

由两路正交的跟踪误差信号采样构成的复采样 C_i

$= I_\Delta(i) + jQ_\Delta(i)$ 所组成的 N 维向量 $[C_1, C_2, \dots, C_N]$ 被送入 MLE 估计器^[1,6], 其输出信号是对环路频率跟踪误差 Δf_d 所对应的频率参数向量 Δf 的估计向量 $\hat{\Delta f}$

$$\hat{\Delta f} = [\hat{\Delta f}_0 \ \hat{\Delta f}_1 \ \hat{\Delta f}_2]^T \quad (11)$$

为方便后面的叙述, 将环路输入信号的 Doppler 频率参数向量 f 称为 Doppler 向量, 将环路对 f 的估计向量 \hat{f} 称为 Doppler 估计向量, 将 f 和 \hat{f} 的差值向量 Δf 称为误差向量, 将环路对 Δf 的估计向量 $\hat{\Delta f}$ 称为误差估计向量.

加法器的功能是将误差估计向量 $\hat{\Delta f}$ 与上一个环路更新周期补偿器输出的本地信号的 Doppler 频率参数向量 $[\hat{f}_d \ 0 \ 0]^T$ 相加, 以获得对 Doppler 向量 f 的观测向量 y . 加法运算可由下式表示

$$y = \hat{\Delta f} + [\hat{f}_d \ 0 \ 0]^T \quad (12)$$

在这里加法运算实际上完成的是对环路频率跟踪误差量的积分, 这个积分过程对于环路的频率跟踪是必不可少的.

Kalman 滤波器的作用是最大程度地抑制观测向量 y 中的热噪声, 其滤波输出是对 Doppler 向量 f 的状态估计 \hat{f} , 它在前面被称为 Doppler 估计向量. 此时的 Kalman 滤波模型可表示为

$$f_{k+1} = Gf_k + v_k \quad (13)$$

$$y_k = Hf_k + u_k \quad (14)$$

式中噪声向量 v 和 u 是零均值、方差分别为 σ_v^2 和 σ_u^2 的 Gauss 白噪声过程, 状态转移矩阵 G 和测量矩阵 H 分别为

$$G = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式(15)中 $T = NT_p$ 为环路的更新周期. Kalman 滤波的输出状态估计 \hat{f} 和估计误差的方差阵 P 可由下列方程迭代计算

$$\hat{f}(k|k-1) = G\hat{f}(k-1|k-1) \quad (17)$$

$$P(k|k-1) = GP(k-1|k-1)G^T + Q \quad (18)$$

$$\Omega(k) = P(k|k-1) + R \quad (19)$$

$$L(k) = P(k|k-1)\Omega^{-1}(k) \quad (20)$$

$$\hat{f}(k|k) = \hat{f}(k|k-1) + L(k)[y - \hat{f}(k|k-1)] \quad (21)$$

$$P(k|k) = [I - L(k)]P(k|k-1) \quad (22)$$

其中 I 为单位矩阵, 噪声过程 u 和 v 的方差阵 R 和 Q 可分别表示为^[7]

$$R = \sigma_u^2 I \quad (23)$$

$$Q = \sigma_v^2 T^2 \begin{bmatrix} T^6/252 & T^5/72 & T^4/30 \\ T^5/72 & T^4/20 & T^3/8 \\ T^4/30 & T^3/8 & T^2/3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

补偿器的功能是将 Kalman 滤波器输出的 Doppler 估计向量 \hat{f} 转换为对输入信号 Doppler 频移的估计 \hat{f}_d , 以补偿由 MLE 估计器造成的环路延时 T . 补偿器的数学模型可表示为

$$\hat{f}_d = [1 \quad T \quad T^2/2] \hat{f} \quad (25)$$

在这里补偿器必须产生两路输出信号来闭合载波跟踪环: 一路信号是数值信号 \hat{f}_d , 它代表的是环路对输入信号 Doppler 频移的估计值; 另一路信号是数值信号 \hat{f}_d 经扩展后所得到的向量信号 $[\hat{f}_d \quad 0 \quad 0]^T$, 它代表的是载波 NCO 输出的本地发生信号的 Doppler 频率参数. 向量信号 $[\hat{f}_d \quad 0 \quad 0]^T$ 经延时器延迟一个环路更新周期 T 后与新近的误差估计向量 $\Delta \hat{f}$ 相加, 得到的是环路对新近的 Doppler 向量 f 的观测向量 y ; 而数值信号 \hat{f}_d 经系

数为 $K_j = 2^J/f_s$ 的数乘运算并转换为 J 位的频率控制字 $F_{cw} = K_j \cdot \hat{f}_d$ 后, 即可作为载波 NCO 的输入信号. 这里 $f_s = 1/T_s$ 为 NCO 的时钟频率, 它也是环路输入中频信号的采样频率.

3 环路的性能测试与分析

用于测试本文提出的基于 MLE 的载波跟踪环(以下简称 MLE 环)跟踪性能的高动态指标是根据现代某些机动导弹的上边界条件而拟定的. 整个高动态过程的持续时间为 8s, 其中最为严重的动态是发生在 3s-3.5s 和 5.5s-6s 两个时间段内幅度为 100g/s 的正、负加加速度, 其间是 25g 的常加速运动^[1]. 高动态运动的速度、加速度和加加速度随时间的变化轨迹分别如图 2(a)、2(b)和 2(c)所示, 这里的速度、加速度和加加速度指标均可用 L1 信号的转换因子 5.25Hz/(m/s) 转换成相应的环路输入测试信号的 Doppler 频率及其一阶和二阶导数. 测试信号由文献[8]中的方法仿真得到.

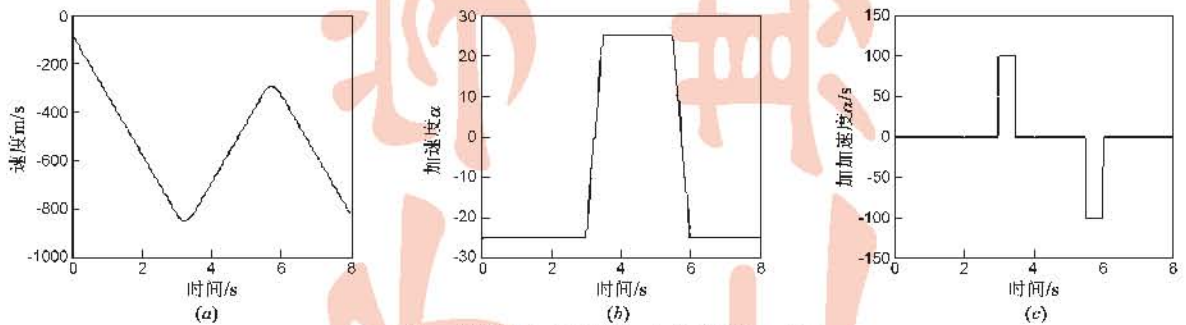


图2 高动态运动的速度、加速度和加加速度

设测试信号的中频 $f_{IF} = 1.405\text{MHz}$, 采样率 $f_s = 5.714\text{MHz}$, 环路的预积分时间 $T_p = 2\text{ms}$, MLE 估计器进行一次处理采用的信号样本点数 $N = 50$. 为了减轻 MLE 估计器的运算负荷、提高环路的可实现性, 在实际应用中 MLE 环仅对二维 Doppler 向量 $f = [f_0 \quad f_1]^T$ 进行估计.

图 3 给出了当输入信号载噪比 $C/N_0 = +\infty$ 时(稳态)MLE 环对测试信号 Doppler 频率和 Doppler 频率变化

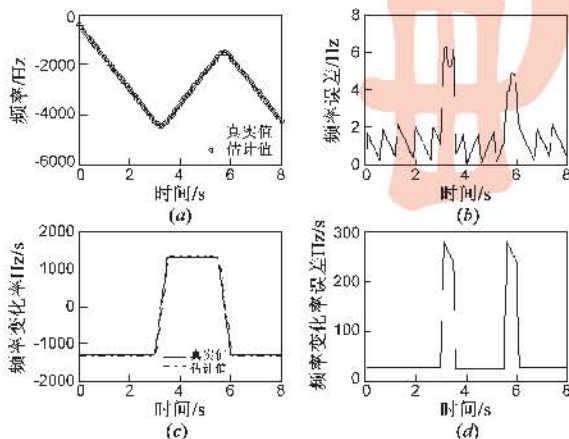
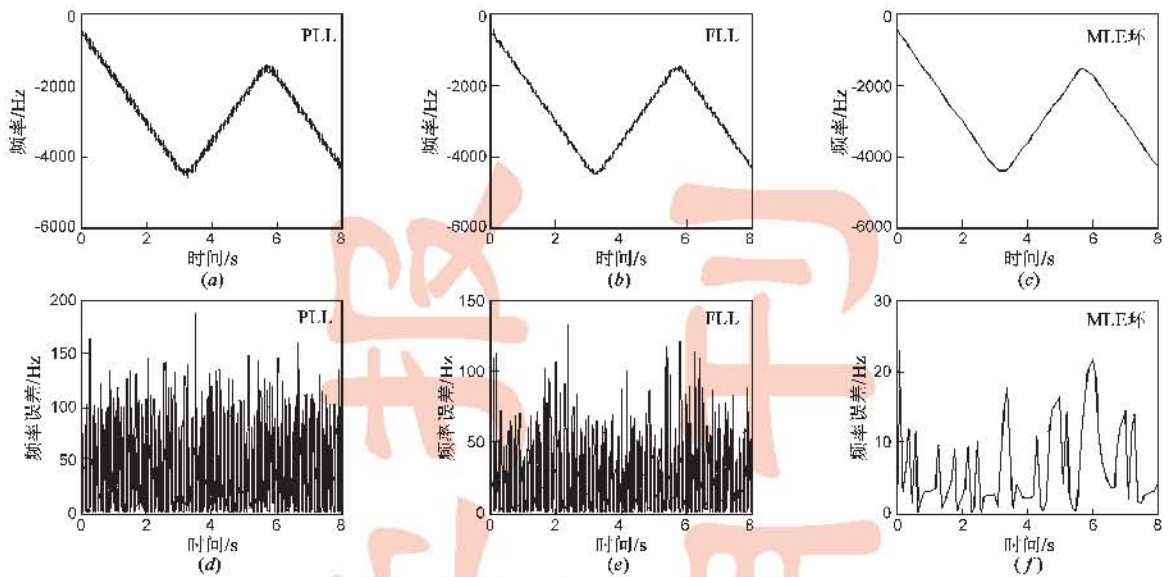
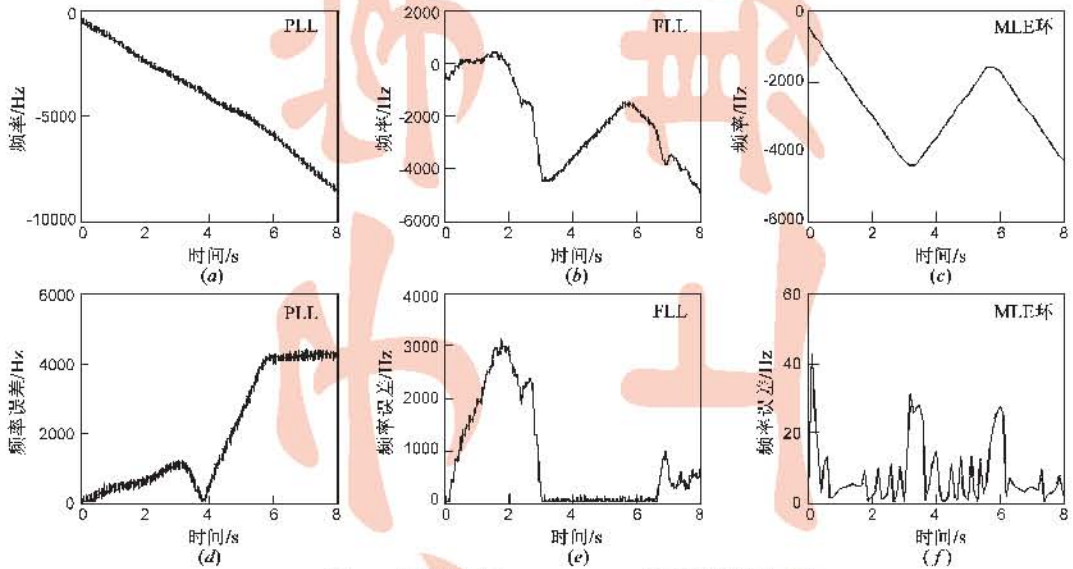


图3 MLE环的稳态跟踪结果

率的瞬时估计值及其瞬时估计误差. 从跟踪结果可以看出, 在稳态时 MLE 环能够精确地跟踪上输入信号的 Doppler 频率及其变化率, 环路的稳态跟踪误差完全来源于输入信号的动态, 当 Doppler 频率发生反向变化即加加速度发生时, 稳态误差出现尖峰. MLE 环的稳态跟踪结果充分证明了本文提出的环路设计理论的正确性.

图 4 和图 5 分别给出了在典型低信噪比 $C/N_0 = 25\text{dB-Hz}$ 和 $C/N_0 = 23\text{dB-Hz}$ 时普通接收机中采用的相位锁定环 (phase-locked loop, PLL)^[9], 频率锁定环 (frequency-locked loop, FLL)^[10] 以及文中的 MLE 环对测试信号 Doppler 频率的瞬时估计值和瞬时估计误差. 为了适应测试信号的高动态同时最大程度地抑制热噪声, 经调试, 将 PLL 和 FLL 的噪声带宽分别设定为 21Hz 和 8Hz. 从跟踪结果可以看出, 当 $C/N_0 = 25\text{dB-Hz}$ 时, 三种跟踪环均能锁定 Doppler 频率, 但 MLE 环的热噪声抖动明显低于 PLL 和 FLL. 随着 C/N_0 降低至 23dB-Hz, 由于噪声功率超过了环路的工作门限, PLL 和 FLL 均失去了对 Doppler 频率的锁定(此时无论如何调整 PLL 和 FLL 的噪声带宽都无法使环路保持锁定), 而 MLE 环仍能正

图4 三种跟踪环在 $C/N_0=25\text{dB-Hz}$ 时的跟踪结果对比图5 三种跟踪环在 $C/N_0=23\text{dB-Hz}$ 时的跟踪结果对比

常工作,只是热噪声抖动的幅度有所增加。

图 6(a)中分别给出了三种跟踪环在不同 C/N_0 时对测试信号 Doppler 频率的失锁概率. 将失锁概率为 0.1 时对应的 C/N_0 值定义为环路的失锁门限,那么从图中的曲线可以确定 PLL、FLL 和 MLE 环在测试的高动态环境下的失锁门限,它们分别为 25dB-Hz、24.6dB-Hz 和 23dB-Hz,这表明此时 MLE 环较 PLL 和 FLL 在失锁门限上的改善可分别达到 2dB-Hz 和 1.6dB-Hz. 图 6(b)中分别给出了三种跟踪环在不同 C/N_0 时对测试信号 Doppler 频率的均方根 (root mean square, RMS) 频率跟踪误差,其结果充分表明了 MLE 环较 PLL 和 FLL 在低信噪比情形下尤其是在失锁门限附近对环路噪声性能的显著改善. 例如在典型值 $C/N_0 = 25\text{dB-Hz}$ 时,PLL、FLL

和 MLE 环的 RMS 频率跟踪误差分别为 47.4Hz、31.0Hz 和 8.6Hz,这表明此时 MLE 环相对于 PLL 和 FLL 在频率跟踪精度上的改善分别达到了 38.8Hz 和 22.4Hz.

4 结束语

高动态、低信噪比条件下的载波精跟踪问题是高动态 GPS 接收机研究的关键问题. MLE 和 EKF 等信号参数估计技术理论上能够在低信噪比时精确估计出高动态信号的 Doppler 参数,但无法直接用于接收信号的实时跟踪与解调. 本文基于 MLE 方法提出了一种高动态 GPS 载波跟踪环的设计方案,并利用具有典型高动态参数的 GPS 载波信号对环路的跟踪性能进行了测试. 测试结果充分表明本文设计的载波跟踪环在高动态环境下优越的跟踪性能,该环路结构对于高动态 GPS

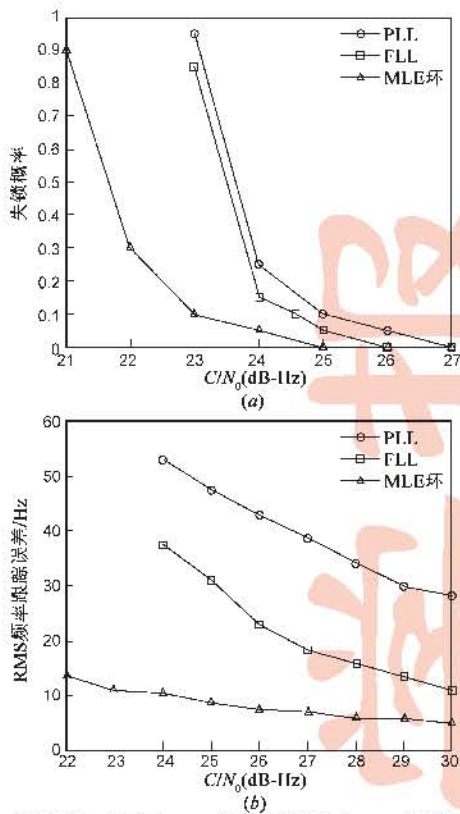


图6 三种跟踪环在不同 C/N_0 时的失锁概率和RMS频率跟踪误差接收机的研究与设计具有重要的使用和参考价值。

参考文献:

- [1] Vilrotter V A, Hinedi S, Kumar R. Frequency estimation techniques for high dynamic trajectories[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(4): 559 - 577.
- [2] 张伯川, 张其善. 高动态接收机的关键问题研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1844 - 1846.
Zhang Bo-chuan, Zhang Qi-shan. Research on the key issue about high dynamic receiver[J]. Acta Electronica Sinica, 2003,

- 31(12): 1844 - 1846. (in Chinese)
- [3] 程乃平, 任宇飞, 吕金飞. 高动态扩频信号的载波跟踪技术研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 2147 - 2150.
Cheng Nai-ping, Ren Yu-fei, Lv Jin-fei. Study of carrier tracking for high dynamic spread spectrum signals[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 2147 - 2150. (in Chinese)
- [4] Parkinson B W, Spilker J J, Axelrad P, et al. Global Positioning System: Theory and Applications[M]. Publication of American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994. 356 - 357.
- [5] Hinedi S, Statman J I. Digital accumulators in phase and frequency tracking loops[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(1): 169 - 180.
- [6] Rife D, Boorstyn R. Single-tone parameter estimation from discrete observations[J]. IEEE Trans Information Theory, 1974, IT-20(5): 591 - 598.
- [7] Castella F R. An adaptive two-dimensional Kalman tracking filter[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1980, 16(6): 822 - 829.
- [8] Xiang Y, Hu X L. A novel time-varying Doppler frequency synthesizer[A]. In: Yuan B Z, Ruan Q Q, Tang X F. Proceedings of ICSP'08[C]. Beijing, 2008. 1854 - 1857.
- [9] Aguirre S, Hurd W. Design and performance of sampled data loops for subcarrier and carrier tracking[R]. TDA Progress Report, 1984, 42(79): 81 - 95.
- [10] Natali F D. AFC tracking algorithms[J]. IEEE Trans Communications, 1984, COM - 32(8): 935 - 947.

作者简介:

向 洋 男, 1980 年生于湖北武汉, 现为华中科技大学博士研究生, 从事专业为信息与通信工程, 感兴趣的研究方向为卫星导航定位、雷达信号处理。 E-mail: huanhuan914@yahoo.com.cn

胡修林 男, 1945 年生于河南滑县, 华中科技大学教授、博士生导师, 在国内外发表学术论文 70 余篇, 感兴趣的研究方向为空间信息科学与技术、卫星导航定位和现代通信网。