

文章编号:1000-6893(2008)06-1660-05

基于滑动 DFT 和插值 DFT 算法的 GPS 信号载波跟踪方法

李春宇, 张晓林, 杨昕欣

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

Carrier Tracking Method of GPS Signals Based on Sliding DFT and Interpolated DFT Algorithms

Li Chunyu, Zhang Xiaolin, Yang Xinxin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘 要: 在分析 GPS 接收机跟踪环路信号特征的基础上,将滑动离散傅里叶变换(DFT)算法和插值 DFT 频率估计算法相结合,提出一种在频域进行的载波跟踪方法。该方法首先根据捕获时得到的粗略载波频率估计值确定计算 DFT 值点的范围,然后利用滑动 DFT 算法计算这部分点的 DFT 值,最后利用插值 DFT 频率估计算法估计载波频率,进行跟踪环路中载波频率的更新。该方法计算复杂度低,便于实际应用。仿真结果显示,该方法能够对载波频率正确跟踪,验证了算法的可行性。

关键词: GPS 接收机; 载波跟踪; 滑动 DFT; 插值 DFT; 频率估计

中图分类号: TN965.5 **文献标识码:** A

Abstract: A frequency-domain carrier tracking method of GPS signals is proposed in this article. The sliding discrete Fourier transformation (DFT) algorithm and interpolated DFT algorithm are integrated to estimate carrier frequency according to the analysis of signals in the carrier tracking loop. The range of DFT points is first worked out based on the frequency estimated in the acquisition program. Then, DFT is performed on those points using the sliding DFT algorithm. Finally, carrier frequency is estimated based on the interpolated DFT algorithm and carrier frequency updates in the tracking loop. This method is convenient for application because it requires less computation overhead. Simulation results show that the method can track carrier frequency accurately and the feasibility of the method is validated.

Key words: GPS receiver; carrier tracking; sliding DFT; interpolated DFT; frequency estimation

GPS 接收机的首要任务是捕获和跟踪来自卫星的 GPS 信号,信号从天线变换到基带后,经过信号处理完成导航定位解算。捕获过程在测距码相位及频率上以固定的间隔进行二维搜索,完成码相位及多普勒频率的粗略估计。捕获后进入跟踪过程,跟踪环路从功能上又分为码跟踪与载波跟踪,分别完成测距码相位及载波频率的精确估计^[1]。

载波跟踪算法设计必须考虑多普勒频移对载波频率的影响。传统的 GPS 接收机中,载波跟踪常采用锁相环(PLL)、频率锁定环(FLL)或两者的组合来进行载波跟踪^[1],所有处理均在时域进行。1991 年, van Nee 等提出利用 FFT 做相关卷

积来实现 GPS 的粗捕获码(C/A 码)信号的快速捕获^[2],此后,频域捕获跟踪方法逐渐受到广大学者的关注。Yang 针对频域捕获跟踪算法进行了大量的研究和实验^[3-6],将 FFT 应用于 GPS 信号的跟踪过程,提出一些简化 FFT 计算的方法^[6];曲江华等将块叠加思想引入码跟踪过程^[7];Tsui 等在载波跟踪时利用离散傅里叶变换(DFT)输出峰值谱线的相位信息进行载波频率的估计^[8];Schamus 等将插值 FFT 方法应用于载波跟踪过程,利用 FFT 输出峰值谱线与相邻谱线的幅度关系进行载波频率的估计^[9]。

由上述文献可知,在频域捕获跟踪方法中,FFT 算法为常用的数学工具。由于捕获时对需提取的信号参量精度要求较低,故频域方法用于信号捕获具有捕获速度快,抗干扰能力强等特点。但是在跟踪过程中,需要精确提取信号参量信息。

收稿日期:2007-09-17; 修订日期:2008-02-19

基金项目:国防科工委民用航空专项

通讯作者:李春宇 E-mail: lichunyu@ee. buaa. edu. cn

如在载波跟踪过程中需要精确跟踪载波频率,对其进行精确估计,这样,就需增加用于频率估计的数据段长度^[10],因此增加了 FFT 的计算负荷,使计算速度减慢,不利于实时跟踪。本文在研究滑动 DFT 算法及插值 DFT 频率估计算法^[10]的基础上,提出基于滑动 DFT 及插值 DFT 频率估计算法的载波跟踪方法。该方法根据捕获过程提供的多普勒载波频率信息,减小 DFT 计算范围,应用多点滑动 DFT 计算有限点数的 DFT 值,进而根据插值 DFT 算法,利用 DFT 输出峰值谱线与相邻谱线的幅度关系进行载波频率的精确估计,完成载波频率跟踪。

1 载波跟踪环路中的信号模型

GPS 接收机 RF 前端信号经下变频和 A/D 采样后输出的数字化中频信号可以表示为^[11]

$$s(n) = AD(nt_s - \tau)C(nt_s - \tau) \cdot \cos[2\pi(f_{IF} + f_d)nt_s + \phi_0] + N'(n) \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为第 n 个采样点时中频信号输出值; A, f_{IF}, ϕ_0 分别为载波的幅度、频率和初始相位; f_d 为多普勒频偏; t_s 为采样间隔; τ 为时间延迟; $D(nt_s)$ 和 $C(nt_s)$ 分别为导航电文数据(D 码)和 C/A 码; N' 为噪声信号。GPS 信号捕获后,可以得到 C/A 码相位及多普勒频率的粗略估计值。跟踪环路在捕获环路估得参数的基础上,对 C/A 码相位及多普勒频率精确跟踪,为数据解调及后续的导航解算提供依据。将解调得到的 D 码结果(1, -1)与输入的中频数字信号相乘,从而解除 D 码调制^[8]。将根据码相位跟踪结果产生的本地 C/A 码与解除 D 码调制后的中频数字信号相乘,完成解扩。由式(1)可得,当中频信号去调制并且解扩以后,所得信号可表示为

$$s'(n) = A\cos [2\pi(f_{IF} + f_d)nt_s + \phi_0] + N'(n) \quad (2)$$

若 C/A 码相位跟踪精确,则载波跟踪环路中需进行频率估计的信号近似为加噪声的单频信号 s' 。

2 一种新的频域载波跟踪方法

2.1 插值 DFT 频率估计算法

由 1 节分析可知,载波跟踪环路中需要对含有多普勒频偏的载波单频信号进行频率的精确估计。这里采用频域方法,即对该信号的采样数据段进行 DFT 运算,分析频谱特性来估计频率。欲

提高频率估计精度,需要增加 DFT 点数,提高频率分辨率,这势必增加运算负荷,不利于实时处理。为了在有限的分辨率下进行高精度的频率估计,可以利用峰值点与相邻两点的幅值关系,应用插值的方法提高频率的估计精度^[10]。

观察式(2)信号,对 $s'(n)$ 进行 DFT 后,频谱的幅度项为

$$S(k) = \frac{A\sin[\pi(k - f_{IF}T)]}{\sin[\pi(k - f_{IF}T)/N]} \quad (3)$$

式中 $T = Nt_s$, 则给出载波频率的估计值表达式为

$$f = f_{IF} + f_d = \frac{1}{Nt_s} \left[k_0 + \frac{r |S(k_0 + r)|}{|S(k_0)| + |S(k_0 + r)|} \right] \quad (4)$$

式中: N 为 DFT 点数; t_s 为采样间隔; k_0 为 $s'(n)$ 的 DFT 最大值谱线的位置; $r = \pm 1$, 当 $|S(k_0 + 1)| \leq |S(k_0 - 1)|$ 时, $r = -1$; 当 $|S(k_0 + 1)| \geq |S(k_0 - 1)|$ 时, $r = 1$ 。

2.2 多点滑动 DFT 算法

GPS 接收机连续接收 GPS 卫星发射的信号,应用频域方法进行基带信号处理时,载波跟踪环路需要连续进行 DFT 运算,以便连续的进行频率估计。每一次需要频率更新时,进行 DFT 运算的数据窗中有大部分为上一周期数据窗中的数据,这就相当于用一个固定长度随时间滑动的滑动窗口来选择样本,在一个滑动窗内计算 N 点 DFT 运算,滑动 DFT 算法正适合这种连续进行 DFT 运算的情形^[12-13]。由于 C/A 码的周期为 1 ms,所以跟踪环路的更新周期一般选为 1 ms 的整数倍,这就使得每次滑动窗中更新多个数据点,因此需要选择多点滑动 DFT 算法^[14],图 1 为多点滑动窗示意图。

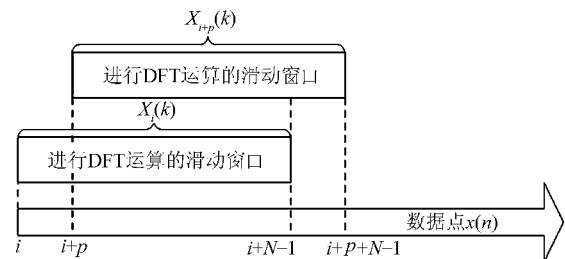


图 1 多点滑动窗示意图

Fig. 1 Multisample-based sliding window

如图 1 所示,设时域信号波形的采样离散值为 $x(n)$, 以 i 为起始位置的 N 点傅里叶变换为

$X_i(k)$, 若 p 为两窗之间的间隔, 则以 $i+p$ 为起始位置的 N 点傅里叶变换为

$$X_{i+p}(k) = \sum_{n=p}^{N-1+p} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}(n-p)k} = \{X_i(k) + \sum_{n=0}^{p-1} [x(n+N) - x(n)] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}\} e^{j\frac{2\pi}{N}pk} \quad (5)$$

多点滑动 DFT 算法利用了前一窗的计算结果计算本窗中数据点的傅里叶变换值, 同时该算法可直接计算滑动窗中单点的傅里叶变换值。

2.3 一种新的频域载波跟踪方法

将滑动 DFT 算法和插值 DFT 频率估计算法相结合, 用于载波频率跟踪, 进行频域处理时, 用多点滑动 DFT 计算频谱的幅度值。由 2.1 节和 2.2 节分析可知, 每次频率更新时, 以 i 为起始位置的 N 点 DFT 算得的频谱幅度值可由式(5)推算得到, 即 $|S_i(k)| = |X_i(k)|$, 再根据插值 DFT 算法将 $|S_i(k)|$ 的值代入式(4), 即可得频率的估计值。

DFT 的频率分辨率为 $1/T$, $T = Nt_s$ 为信号的累积时间, 当 t_s 为定值时, DFT 的频率分辨率受到滑动窗长度 N 的制约。若频率分辨率过低, 即使采用插值 DFT 的方法也很难提高频率的估计精度。所以, 应该累积一定的纯载波数据段的长度(如 N 为 20 ms 的数据段长度)用于频谱分析。当 GPS 信号极其微弱时, 窗口长度应适当增加。

目前应用频域方法进行 GPS 信号捕获跟踪的研究中, 多使用 FFT 算法来完成 DFT 的运算^[2-9]。若本文所述的滑动窗中 N 点傅里叶变换值由 FFT 来算得, 计算负荷过大, 难以实时处理。即使应用 2.2 节提到的多点滑动 DFT 算法的递推公式来计算 N 点的傅里叶变换值, 由式(5)可见计算量仍然巨大。下面将分析减少计算量的方法。

由式(4)可知, 进行频率估计时, 只需要最大值谱线及其附近的一条谱线值, 并且捕获过程中需进行频率的步进搜索, 捕获后已粗略得到多普勒频率的搜索值, 因此可以考虑计算捕获得到的频率及其附近区域频率的对应点的谱线值, 这些谱线只要包括式(4)中所需的谱线值, 就可以满足频率估计的要求。

设捕获到的频率为 f_{acq} , 频率搜索的步进值为 f_{step} , 则载波多普勒频率范围应为

$$f \in [f_{\text{acq}} - f_{\text{step}}, f_{\text{acq}} + f_{\text{step}}] \quad (6)$$

由 DFT 基本理论可知, 进行 N 点 DFT 运算时, 对应式(6)的索引范围为

$$N_{\text{range}} \in \left[\text{int} \left(\frac{f_{\text{acq}} - f_{\text{step}}}{f_s} N \right), \text{int} \left(\frac{f_{\text{acq}} + f_{\text{step}}}{f_s} N \right) \right] \quad (7)$$

式中: $\text{int}(\cdot)$ 表示取整。由此, 只需算得式(7)中数据点的傅里叶变换值即可应用式(4)进行频率估计。与 FFT 一次算出所有点的傅里叶变换值不同, 应用式(5)可以直接求得单点的傅里叶变换值, 这就使直接计算式(7)中所需点的傅里叶变换值成为可能, 这样便极大地降低了计算复杂度。

基于以上分析, 将多点滑动 DFT 算法与插值 DFT 频率估计算法相结合, 提出适合频域处理的载波跟踪方法, 该方法的步骤总结如下:

第 1 步 根据式(7)求得需要计算傅里叶变换值的数据点范围。

第 2 步 根据多点滑动 DFT 算法, 由式(5)计算第 1 步中所得数据点的傅里叶变换值。

第 3 步 考虑第 2 步中的计算结果, 根据插值 DFT 算法, 应用式(4)进行载波多普勒频率估计, 进而对整个跟踪环路进行频率更新。

需要说明的是, 由于滑动 DFT 算法采用的是递推模式, 由前一个频率单元值计算下一个频率单元值, 那么需要考虑起始频率单元的获取问题。可以采用两种办法, 一种是用 FFT 算法完成起始单元的 N 点 DFT 计算; 另一种相对优越的方法是起始单元结果采用 Goertzel 算法获得^[14-15]。

3 算法复杂度分析

目前, 在频域上进行载波跟踪主要有以下几种方法:

(1) 利用 FFT 输出峰值谱线的相位信息进行载波频率的估计^[8]。

(2) 应用插值 FFT 的方法, 利用 FFT 输出峰值谱线与相邻谱线的幅度关系进行载波频率的估计^[7,9]。

(3) 利用 zoom-FFT 方法细化频谱信息, 估计载波频率^[4-6]。

前两种方法均需要对累积的数据段直接进行 FFT 操作。采用本文提出的方法在频域上进行载波跟踪时, 只需计算窗内少数点的 DFT 值, 而直接应用 FFT 算法需一次计算所有点的 DFT 值。因此, 本文方法将比直接应用 FFT 方法节约

计算量。而本文方法相对于第 3 种方法在算法复杂度上的优势也将通过以下的定量分析得到体现。

若点数 $N=2^L$, 以应用基 2FFT 算法为例, 直接应用 FFT 方法的计算量为

$$\left. \begin{aligned} C_{mul} &: \left(\frac{N}{2}\right) \lg N = \frac{NL}{2} \\ C_{add} &: N \lg N = NL \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: C_{mul} 为复乘运算次数; C_{add} 为复加运算次数。若 $N \neq 2^L$ 时, 会进一步增加 FFT 算法的复杂度。

令 Q 为 N 点 DFT 变换中需输出的点数, 即 $Q=2 \operatorname{int}\left(\frac{f_{step} N}{f_s}\right)$, 在实际系统中^[4-6] $Q \geq 2$, 若 $Q=2^L$, 则 zoom-FFT 方法的计算量为

$$\left. \begin{aligned} C_{mul} &: 2N \lg Q - 4Q + 4N > 4N \\ C_{add} &: 3N \lg Q - 6Q + 6N > 6N \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

若 $Q \neq 2^L$ 时, 会进一步增加 zoom-FFT 算法的复杂度。

本文算法的计算量如下:

$$\left. \begin{aligned} C_{mul} &: Q(p+1) \\ C_{add} &: 2Qp \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

常规环境下的 GPS 接收机中, 多选取扫频间隔 f_{step} 为 500 Hz^[1,8-9], 跟踪频率更新周期为 1 ms, 即两相邻窗口的滑动间隔为 1 ms 的采样点数, 则由式(9)可得

$$\left. \begin{aligned} C_{mul} &: Q(p+1) \approx N \\ C_{add} &: 2Qp \approx 2N \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由 2.3 节分析可知, 为提高频率估计精度, 应该累积一定的纯载波数据段的长度用于频谱分析, 所以数据段的总采样点数 N 取值较大, 因此比较式(8)和式(11)可得本文算法的计算量远小于前两种直接进行 FFT 操作的方法; 同时比较式(9)和式(11)可得本文算法的计算复杂度相对于第 3 种 zoom-FFT 方法也具有明显优势。

4 仿真结果与分析

由 2 节和 3 节分析可知, 应用本文方法和直接使用插值 FFT 方法进行载波跟踪时, 两者都是利用 DFT 输出峰值谱线与相邻谱线的幅度关系进行载波频率的精确估计, 两种方法估值性能相当, 但本文方法能够大幅度降低计算复杂度。这里用计算机仿真的方法验证以上分析, 来说明本文方法的正确性。仿真时, 由程序模

拟产生 GPS L1 频段的信号, 长度为 15 个导航电文的数据段。这里采用 GPS 软件接收机中的典型参数设置^[4-9], 接收端的采样频率 f_s 为 5 MHz, 即在 1 ms 的 C/A 码周期内共有 5 000 个采样点, 数字中频 f_{IF} 为 1.25 MHz, 假设进入跟踪环路时初始的多普勒频移 f_d 为 1 907 Hz, 接收机载体与卫星之间的相对加速度为 $2g$, 仿真时的信噪比 SNR 为 -16 dB。

GPS 信号捕获后, 得到粗略的 C/A 码相位和载波多普勒频率的粗略估计值, 然后进入跟踪过程。下面在采用相同的码跟踪方法的前提下, 将本文方法与直接使用插值 FFT 的载波跟踪方法进行比较分析。

表 1 显示了两种方法所有载波频率更新周期中跟踪频率估计值的统计参数。可见, 两种方法的频率估计值与实际多普勒频率值的均方差在同一量级并较为接近, 这与上文理论分析一致。

表 1 两种载波跟踪方法的性能比较

Table 1 Performance comparison of carrier tracking methods

方 法	插值 FFT 方法	本文方法
均方差/Hz	0.69	0.60

图 2 和图 3 为应用这两种频域方法进行载波跟踪时的情形, 仿真时滑动窗长度 $N=100\ 000$ (累积 20 ms 数据段), 滑动步长 $p=5\ 000$ 。图 3 为采用本文提出的方法进行载波跟踪的情形, 由图 3 及表 1 数据可知, 该方法与图 2 所示的插值 FFT 方法都能完成载波跟踪, 可见本文方法的正确性。同时, 由式(7)可知, 应用本文方法只需要计算滑动窗内 20 点的 DFT 值便可以进行频率估计, 而不必算出窗内所有点的 DFT 值, 算法计算负荷明显小于图 2 方法, 更便于实际应用。

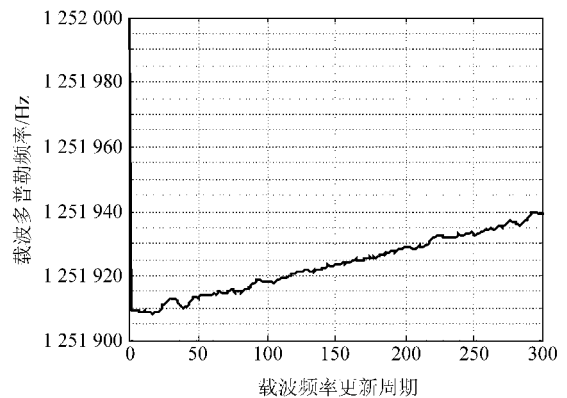


图 2 采用插值 FFT 方法进行载波跟踪

Fig. 2 Carrier tracking based on interpolated FFT

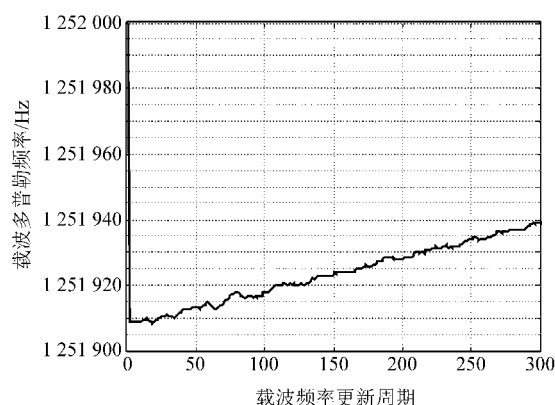


图 3 采用本文方法进行载波跟踪

Fig. 3 Carrier tracking based on proposed method

5 结 论

提出了一种在频域进行的载波跟踪方法。该方法将滑动 DFT 算法和插值 DFT 频率估计算法相结合,首先根据捕获时得到的粗略载波估值信息减少滑动窗中需计算 DFT 值的点数,然后利用滑动 DFT 算法计算这部分点的 DFT 值,最后采用文献[10]中的插值 DFT 的频率估计算法,利用 DFT 输出峰值谱线与相邻谱线的幅度关系进行频率估计,完成跟踪环路中载波频率的更新。与其他频域载波跟踪方法相比,本文提出的方法能够减小计算量,因此有利于工程实现。

参 考 文 献

- [1] Kaplan E D. GPS 原理与应用[M]. 邱致和,王万义,译. 北京:电子工业出版社,2002:75-132.
Kaplan E D. Understanding GPS: principles and applications[M]. Qiu Zhihe, Wang Wanyi, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 75-132. (in Chinese)
- [2] van Nee D, Coenen A. New fast GPS code acquisition technique using FFT[J]. Electronic Letters, 1991, 27(2): 158-160.
- [3] Yang C. FFT acquisition of periodic, aperiodic, puncture, and overlaid code sequences in GPS[C]//ION GPS 2001. 2001: 137-147.
- [4] Yang C. Frequency-domain GPS baseband processor design and initial test results[C]//ION GPS 2001. 2001: 2859-2870.
- [5] Yang C. Tracking GPS code phase and carrier frequency in the frequency domain[C]//ION GPS/GNSS 2003. 2003: 628-637.
- [6] Yang C. Zoom, pruning, and partial FFT for GPS signal tracking[C]//ION-NTM-01. 2001: 839-849.
- [7] 曲江华,袁洪,宁百齐. 一种新的软件 GPS 静态接收机频域跟踪方法[J]. 测绘学报, 2005, 34(4): 312-316.
Qu Jianghua, Yuan Hong, Ning Baiqi. A new tracking scheme in the frequency domain for a static software GPS receiver[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(4): 312-316. (in Chinese)
- [8] Tsui J B Y, Stockmaster M H, Akos D M. Block adjustment of synchronizing signal (BASS) for global positioning system (GPS) receiver signal processing[C]//ION GPS 1997. 1997: 637-643.
- [9] Schamus J, Tsui J, Lin D, et al. Real-time software GPS Receiver [C]//ION GPS 2002. 2002: 2561-2565.
- [10] Rife D C, Vincent G A. Use of the discrete Fourier transform in the measurement of frequencies and levels of tones [J]. Bell Syst Tech J, 1970, 49: 197-228.
- [11] 李春宇,张晓林,张超,等. 遗传算法在微弱 GPS 信号捕获方法中的应用 [J]. 航空学报,2007,28(6): 1433-1437.
Li Chunyu, Zhang Xiaolin, Zhang Chao, et al. Genetic algorithm application in acquisition method of weak GPS signals[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(6): 1433-1437. (in Chinese)
- [12] Jacobsen E, Lyons R. The sliding DFT[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(2): 74-80.
- [13] Lyons R G. 数字信号处理[M]. 2 版. 朱光明,程建远,刘保童,等,译. 北京:机械工业出版社,2006:361-366.
Lyons R G. Understanding digital signal processing[M]. 2nd ed. Zhu Guangming, Cheng Jianyuan, Liu Baotong, et al, translated. Beijing: China Machine Press, 2006: 361-366. (in Chinese)
- [14] 黄寒华. 滑动 DFT 算法研究[D]. 南京:东南大学,2006.
Huang Hanhua. Research on the sliding DFT algorithm [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [15] Prokis J G, Manolakis D G. 数字信号处理:原理、算法与应用[M]. 3 版. 张晓林,译. 北京:电子工业出版社,2004: 395-396.
Prokis J G, Manolakis D G. Digital signal processing: principles, algorithms, and applications[M]. 3rd ed. Zhang Xiaolin, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 395-396. (in Chinese)

作者简介:

李春宇(1981—) 男,博士研究生。主要研究方向:卫星导航接收机系统,数字电视系统设计等。

Tel:010-82317219

E-mail: lichunyu@ee. buaa. edu. cn

张晓林(1951—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:卫星导航系统,飞行器遥测遥控、集成电路设计、数字电视系统设计的科研与教学工作。

Tel:010-82339153

E-mail: zxl@buaa. edu. cn

(责任编辑:鲍亚平,张利平)