

GPS 信号 C/A 码快速精密捕获技术研究*

李新山, 郭伟

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731)

摘要: 提出了一种基于平均相关技术的快速精密的 GPS 信号 C/A 码捕获方案, 该方案将接收到的中频信号和本地复制 C/A 码以高采样频率进行采样, 然后通过对它们进行平均处理后以 1 024 点的 FFT 处理器计算相关能量值。与不经过平均处理的基于 FFT 的码捕获方案相比, 该方案的运算复杂度约为 1/22, 可实现快速捕获的目的; 与捕获精度为半个码片的常用码捕获方案相比, 该方案的捕获灵敏度理论上提高约 2.2 dB。最后通过仿真验证了该方案的可行性。

关键词: GPS; 码捕获; 平均相关; 快速傅里叶变换

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)04-1131-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.042

Research on fast fine C/A code acquisition technique of GPS signal

LI Xin-shan, GUO Wei

(National Key Laboratory of Science & Technology on Communications, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper presented a fast fine C/A code acquisition scheme of GPS signal based on averaging correlation technique. In the proposed scheme, it sampled the received IF signal and the local C/A replica code at a high sampling frequency, then both of them were dealt with averaging process and the value of correlation energy could be calculated by the 1 024-point FFT processor. It reduced the computational complexity in the proposed scheme to about 1/22 compared with the FFT-based code acquisition scheme without averaging process. It could realize the purpose of rapid acquisition. It improved the acquisition sensitivity of the proposed scheme theoretically by about 2.2 dB, compared to the conventional acquisition scheme with acquisition precision of half a chip. Finally, simulations performed to verify the feasibility of the proposed scheme.

Key words: GPS; code acquisition; averaging correlation; fast Fourier transform(FFT)

GPS 系统已经广泛应用在民用测量和个人导航等领域。为了跟踪 GPS 信号并进行位置解算, 必须先实现信号的捕获。民用接收机只能接收 GPS 系统中的标准定位服务信号, 信号格式为 BPSK 调制的直接序列扩频信号, 即常说的 C/A 码。GPS 系统中每颗卫星在 L1 波段上发射由独特的 C/A 码和各卫星共同的导航数据电文调制的载波信号。GPS 的信号捕获首先是一个卫星搜索过程, 针对每颗特定的卫星再进行伪码相位和载波频率的二维搜索^[1,2]。输入信号与本地产生的伪码调制信号进行相关的过程称为码捕获。

GPS 码捕获技术常用的有串行和并行两种方式。早期的 GPS 接收机多采用串行捕获方式, 即在附加特定的多普勒偏移的载波频率下, 以某个码相位搜索增量(典型情况下为半个码片)对整个 C/A 码长度进行搜索, 找到相关峰值最大的位置即得到接收信号的码相位^[3]。C/A 码并行捕获方式利用了 C/A 码具有周期性的特点, 不同码相位上的时域相关过程其实就是一个循环相关过程, 而循环相关则可以通过快速傅里叶变换(FFT)技术并行计算出各个码相位的相关值^[4,5]。文献[6]提出一种应用于最大长度序列(MLS)搜索相关峰值的相位相关捕获(PCA)方法, 当序列较长时可通过将长序列经过多层分解变为短序列从而减少计算量, 然而在多层分解时, 上一层的参

数估计值会影响下一层的参数估计值, 在噪声环境中的效果将大打折扣。考虑到 GPS 中 C/A 码的长度仅为 1 023、1 024 点的 FFT 处理芯片已非常普及, 本文的码捕获方案采用基于 FFT 的并行捕获技术。

随着室内定位及高灵敏度 GPS 接收机的不断发展, 对码捕获时的精度要求越来越高, 这就要求对接收信号进行捕获时必须以高采样频率进行采样, 以减少 C/A 码相关时的能量损耗。如果直接采用 FFT 计算一个 C/A 码周期内的相关值, 则对数字信号处理芯片的要求极高且增高了接收机成本。考虑到平均相关技术^[7,8]通过平均操作可将大数据样本变换成多个小数据样本再进行 FFT 运算, 既降低了对 FFT 芯片的要求, 又加快了运算速度, 能够很好地兼顾 GPS 码捕获的快速性及精密性要求, 所以本文采用基于平均相关的并行码捕获技术, 相对于半个码片的捕获精度, 理论上能够提高接收机的灵敏度增益约 2.2 dB。

1 信号模型及算法描述

1.1 信号模型

为简化起见, 假设单个 GPS 卫星的接收信号经下变频后的中频信号模型为^[9]

收稿日期: 2013-06-22; **修回日期:** 2013-07-28 **基金项目:** 国家“973”计划基金资助项目(2009CB320405); 国家自然科学基金资助项目(61271168, 61001085)

作者简介: 李新山(1972-), 男, 湖南涟源人, 博士研究生, 主要研究方向为 GPS 信号接收、处理(xsli@163.com); 郭伟(1964-), 男, 四川达州人, 教授, 博导, 主要研究方向为移动通信网及通信信号处理。

$$y_n = Ad(t_n)c[(1+\eta)(t_n-\tau)]\cos[2\pi(f_{IF}-f_D)t_n+\varphi_0]+v_n \quad (1)$$

其中: y_n 为射频前端在取样时刻 t_n 的输出; 常数 A 为信号幅度; $d(t)$ 为取值 +1 或 -1 的导航数据电文; $c(t)$ 为接收信号中的 C/A 码, 标称码率为 1.023 MHz; η 为多普勒频移对码率的微扰因子, 当信号较强时信号捕获可在一个 C/A 码周期内完成, 因而可忽略此因子的影响; τ 为 C/A 码的相位偏移; f_{IF} 为接收信号与 $L1$ 载波频率混频后的标称中频频率; f_D 为接收信号的多普勒频移; φ_0 为接收信号初始相位; 忽略电离层效应, 微扰因子 η 与多普勒频移 f_D 满足这样的关系: $\eta = f_D/1575.42 \times 10^6$; v_n 为高斯噪声。

接收机产生的对该颗卫星的本地复制 C/A 码调制的中频信号同相分量 i_n 和正交分量 q_n 可分别表示为

$$i_n = c[(1+\hat{\eta})(t_n-\hat{\tau})]\cos[2\pi(f_{IF}-\hat{f}_D)t_n] \quad (2)$$

$$q_n = -c[(1+\hat{\eta})(t_n-\hat{\tau})]\sin[2\pi(f_{IF}-\hat{f}_D)t_n] \quad (3)$$

其中: $\hat{\eta}$ 、 $\hat{\tau}$ 、 $\hat{f}_D$ 分别为 η 、 τ 和 f_D 的估计值, 且 $\hat{\eta} = \hat{f}_D/1575.42 \times 10^6$ 。

本地中频信号同相分量 i_n 和正交分量 q_n 与接收中频信号相关后的同相分量 I_n 和正交分量 Q_n 分别为

$$I_n = \sum_{n=1}^N y_n i_n \quad (4)$$

$$Q_n = \sum_{n=1}^N y_n q_n \quad (5)$$

其中: N 为相关周期内的样本点数。

综合式(2)~(5), 接收中频信号与本地中频信号相关后的值可表述为

$$Y_n = I_n + jQ_n = \sum_{n=1}^N y_n c[(1+\hat{\eta})(t_n-\hat{\tau})]\exp\{-j[2\pi(f_{IF}-\hat{f}_D)t_n]\} \quad (6)$$

1.2 FFT 快速捕获原理

对 GPS 系统来说, 码信号的捕获是一个输入序列与本地序列的相关过程, 相关输出 $y(n)$ 为^[10]

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)h(n+m) \quad (7)$$

其中: $x(m)$ 为输入序列, $h(n+m)$ 为本地复制序列。在该式中, $h(n+m)$ 中的时移是循环的, 因为 C/A 码具有周期性。对式(7)进行离散傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} Y(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(m)h(n+m)e^{-j2\pi kn/N} = \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \left[\sum_{n=0}^{N-1} h(n+m)e^{-j2\pi(n+m)k/N} \right] e^{j2\pi mk/N} = \\ &= H(k) \sum_{m=0}^{N-1} x(m)e^{j2\pi mk/N} = X(k)H(-k) \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $H(-k)$ 表示本地复制序列反序列的傅里叶变换。通过变量替换式(8)也可以为

$$Y(k) = H(k)X(-k) \quad (9)$$

由于接收序列属于实数序列, 则有 $H(-k) = H^*(k)$, 其中: $*$ 表示求复共轭。故式(8)和(9)可以综合表示成

$$Y(k) = H(k)X^*(k) = H^*(k)X(k) \quad (10)$$

通过傅里叶逆变换, 从而相关序列可表示为

$$y(n) = \text{IFFT}(\text{FFT}(h(n)) \times \text{con } j(\text{FFT}(x(n)))) = \text{IFFT}(\text{FFT}(x(n)) \times \text{con } j(\text{FFT}(h(n)))) \quad (11)$$

其中: $\text{con } j(\cdot)$ 表示求复共轭。当样本点数 N 为 2 的整数幂时, 采用 FFT 运算(简称基-2 FFT)具有高效性。经过两次 FFT 变换和一次 IFFT 变换, 即可得到所有码相位偏移量的相关值, 因而可用于 C/A 码的并行快速捕获。

1.3 基于平均相关的码捕获

当相关周期内的采样点数 N 较大时, 循环相关法要作 N 点 FFT 和 IFFT 运算, 不利于接收信号的快速捕获。Starzyk 等人^[7]将大采样频率得到的样本点通过平均处理变成与 C/A 码率相当的样本点, 即每毫秒 1 023 个样本点。如果每个 C/A 码片内的取样点数最多为 K 个, 则在最初的 K 个样本点中根据平均处理起始点的不同共可得到 K 个平均后的样本序列。将本地复制信号也进行相同的处理后, 通过 FFT 和 IFFT 运算得到 K 个相关结果序列, 由最大相关峰值得到本地 C/A 码相位估计值。由于平均相关法只对平均后的样本序列进行小样本点的 FFT 和 IFFT 运算, 从而大大减少了捕获时间。

在进行平均相关处理时, 由于每个 C/A 码周期内经过平均后的样本点数为 1 023, 为进行基 2 的 FFT 和 IFFT 运算, 常用的方法是进行补零(zero padding)处理^[11]。在码相位未知的情况下, 如果本地复制信号与接收信号补零的位置不一致时, 将降低 C/A 码自相关峰值; 严重时如果补零的位置相差半个 C/A 码周期, 则自相关峰值将减半。鉴于补零法的上述缺陷, 本文直接以 1.024 MHz 的采样频率对本地信号进行采样, 从而使一个 C/A 码周期内的样本点数为 1 024 以便于 FFT 运算。同时, 这么处理还能减少本地信号进行分组和 FFT 运算的次数, 进一步减少了运算量。图 1 是对一个周期内的 C/A 码分别进行 1 023 和 1 024 点采样后的自相关曲线, 相关值取绝对值。为便于比较, 均将峰值置于第 500 个码片的位置。从中可以看出, 相关后的峰值即为采样点数, 两种采样方案峰值幅度相当, 而 1 024 点采样的第二峰值(96)稍大于 1 023 点采样的第二峰值(81), 因而在捕获时性能略有下降。

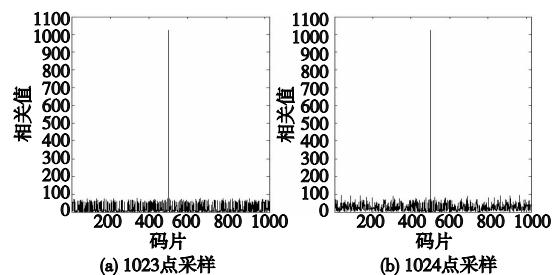


图1 两种采样方案的自相关曲线

2 快速码捕获方案及性能分析

2.1 捕获方案

基于平均相关的快速捕获原理, 本文设计的码捕获原理框图如图 2 所示。

针对某一特定的卫星发射信号, 接收机首先在射频前端混频之后变为中频信号, 直接对中频信号进行采样和 A/D 转换后, 根据采样频率在不同的样本起始点进行平均后形成 K (设采样频率为 $K \times 1.024$ MHz) 组数字中频信号, 经 FFT 运算后分别与本地同相和正交相信号经过 FFT 运算后的复共轭值相乘。相乘后的信号经 IFFT 运算后即获得各个码相位处相关值的同相和正交相成分, 经平方求和操作后取 K 组相关值中的最大值与该组中第二大值的比值作为判决变量。将它与判决门限进行比较, 如果大于判决门限, 则成功捕获该卫星并获得相应的多普勒频移和码相位的估计值; 如果小于判决门限, 则调整多普勒频移估计值。继续该过程, 直至搜索完预设的多普勒频移范围。由于对任意特定的卫星信号和多普勒频移范围, 本地复制信号的 FFT 复共轭值是确定的, 因而也可以将这些

值预先存储在存储单元中以加快运算速度。

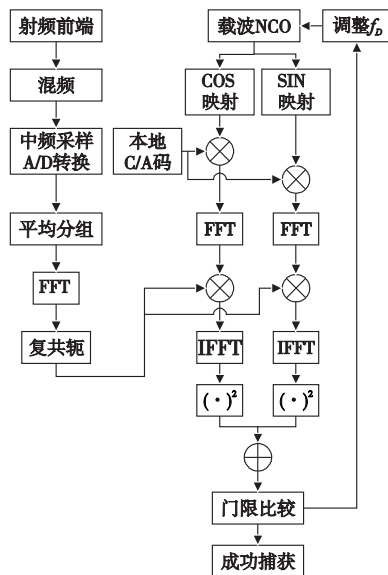


图2 快速码捕获原理框图

2.2 性能分析

2.2.1 运算复杂度

对于基-2 FFT和IFFT运算来说,其加法和乘法次数为 N ($\log_2^N$)次;如果采用循环相关,则加法和乘法次数为 N^2 次,如前所述,FFT运算相比循环相关大大降低了运算量。为了提高码捕获的精度,通常 K 值取16或者更大的值,本文仿真实验中采样频率为16.384 MHz。在这种情况下,如果直接采用FFT进行1ms样本点的相关运算,则乘法和加法运算量为 $16384 \times \log_2^{16384} = 2.29376 \times 10^5$ 次,运算量仍然很大,且对FFT运算芯片的要求高。采用平均相关技术,1ms内的样本点经平均后变为16个1024的样本序列分别进行FFT运算,这时便于采用多个FFT芯片并行处理,而每个芯片的加法和乘法运算量为 $1024 \times \log_2^{1024} = 1.024 \times 10^4$ 次,运算复杂度约为不采用平均相关技术的1/22,便于实时处理。

2.2.2 对捕获灵敏度的影响

提高采样频率进行精密捕获,由于码相位精度提高,因而能降低码相关峰值损耗,提高捕获灵敏度。

GPS系统的C/A码采用矩形码片,其自相关函数为

$$R(\tau) = \begin{cases} A^2(1 - \frac{|\tau|}{T_c}) & |\tau| \leq T_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中: T_c 为C/A码码片宽度。若精密码捕获采样频率为16.384 MHz,则对应的码片误差 $|\tau| \leq T_c/32$,相关峰值损耗为

$$20 \log_{10}^{(R(\tau)/A^2)} \leq 20 \log_{10}^{(31/32)} \approx -0.276 \text{ dB} \quad (13)$$

若采样常用的码捕获精度(码搜索步长为1/2码片),此时对应的码片误差 $|\tau| \leq T_c/4$,相应地,相关峰值损耗为

$$20 \log_{10}^{(R(\tau)/A^2)} \leq 20 \log_{10}^{(3/4)} \approx -2.5 \text{ dB} \quad (14)$$

比较式(13)和(14)可知,精密码捕获的最大相关峰值损耗降低约2.2 dB,也就是说码捕获灵敏度将提高约2.2 dB。

3 捕获仿真与分析

本章通过MATLAB对所提的捕获方案进行了相关时间为1ms的捕获仿真。为了使每个分组的长度一致,仿真产生了2ms的接收数据。仿真实验采用式(1)所示的接收的中频信号模型,对第5号卫星的C/A码信号进行仿真。其中: $d(t)$ 取值

为+1;多普勒频移对码率的微扰因子 $\eta = 0$;采样频率为16.384 MHz;中频频率为8.192 MHz;接收信号初始相位 $\varphi_0 = 0$;噪声为高斯白噪声,均值为0,方差为1;信号幅度为^[11]

$$A = \sqrt{2} \sigma_v (10^{(S/N)/20}) \quad (15)$$

其中: σ_v 是噪声的标准偏差,仿真时令 $\sigma_v = 1$;S/N为期望的信噪比,单位为dB。当考虑输入带宽为2.048 MHz时,接收机热噪声约为-141 dBW;如果输入信号为标称功率-160 dBW,则 $S/N = -19$ dB。

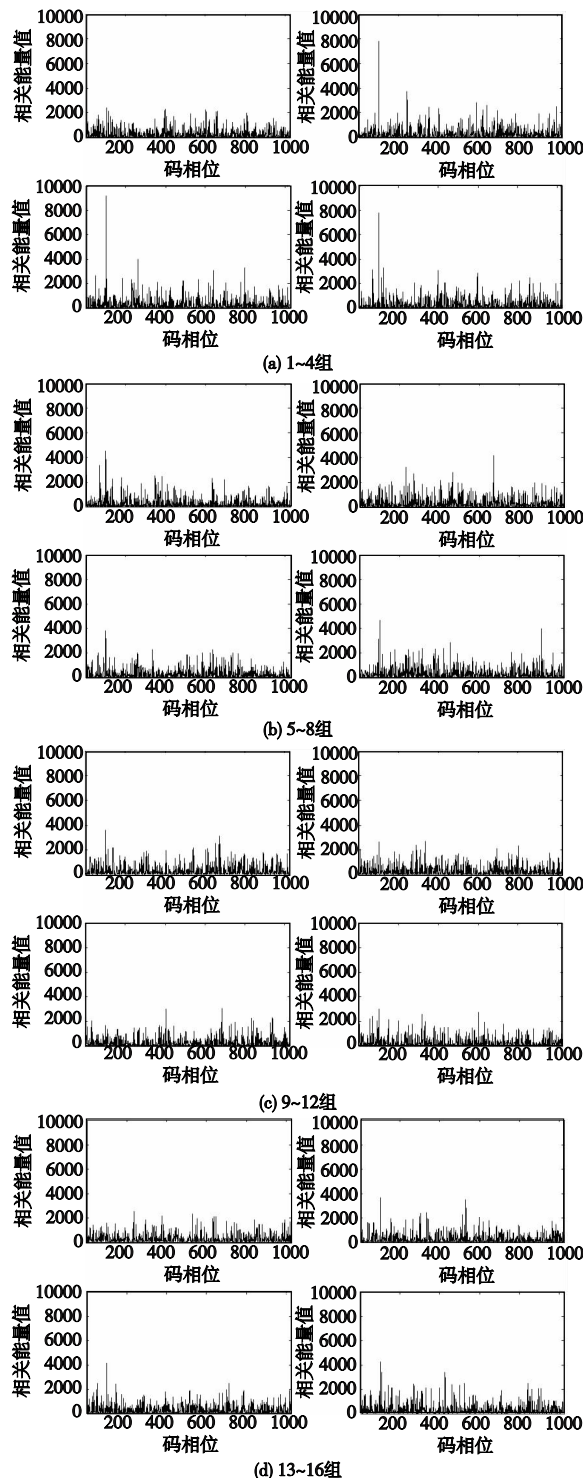


图3 平均相关处理后各组的相关结果 ($f_0=500$ Hz)

现实的GPS测量中,实际的噪声功率无法预测,所以在本文中没有采用相关能量峰值作为判决量,而是采用 K 个分组中得到的相关能量值的最大峰值与该组中第二大值的比值作为判决量^[8,9],即

$$R = \frac{\max(I_n^2 + Q_n^2)}{\sec \max(I_n^2 + Q_n^2)} \quad (16)$$

如果 $R > 2^{[9]}$, 则认为捕获成功, 与最大相关能量峰值相对应的码相位和多普勒频移即为其估计值。

本文仿真了信噪比为 -20 dB 时的场景。假设 C/A 码的相位偏移 τ 位于第 1 619 个样本点处, 多普勒偏移为 500 Hz, 多普勒频率范围为 $(-5 \sim 5$ KHz), 搜索步长为 500 Hz。

图 3(a) ~ (d) 中从左至右、从上到下依次显示第 1 ~ 16 组在多普勒偏移为 500 Hz 处的相关结果。图中第 3 个分组中的相关能量峰值为 $\max(I_n^2 + Q_n^2) = 9150.5$, 码相位为 102, 与设定的相位偏移相符, 是 16 组中的最大峰值; 该分组中的第二大相关能量值为 $\sec \max(I_n^2 + Q_n^2) = 4015.3$, 从而 $R = 2.279 > 2$, 根据判决准则可知捕获成功。

为了更直观地了解基于平均相关的码捕获效果, 图 4 显示出了经平均相关处理后第 3 组接收信号在各个多普勒频移和码相位处与本地信号的相关结果。可以清楚地看出, 在多普勒频移和码相位的二维搜索平面上, 位于多普勒频移 500 Hz 和码相位为 102 处的点具有最大相关能量值。

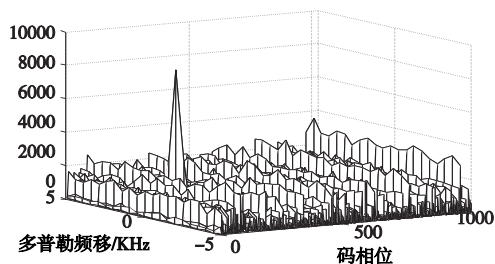


图4 平均相关处理后第3组在各个多普勒频移和码相位处的相关结果

4 结束语

本文提出了一种基于平均相关的快速精密的 GPS 码捕获方案, 该方案将接收到的中频信号用高采样频率进行采样实现精密捕获, 然后通过平均相关将高采样点的数据样本分组成多个低速率的样本, 从而可以 1 024 点的低价 FFT 芯片计算相关能量值, 满足快速捕获的要求。通过比较各组的相关能量峰值, 找出最大峰值和该分组中的第二大相关能量值, 由判决准则确定捕获是否成功, 最大峰值对应的多普勒频移和码相位即

为它们的估计值。理论分析表明, 该捕获方案较常规码捕获方案提高捕获灵敏度 2.2 dB。本文通过 MATLAB 对该方案进行了仿真, 既验证了该方案能精密捕获 GPS C/A 码, 又验证了直接对接收码和本地复制码进行 1 024 点的采样和相关切实可行, 能弥补补零法的缺陷, 实现快速捕获。

参考文献:

- [1] PARKINSON B W, SPILKER J J. Global positioning system: theory and applications vol I [M]. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1996: 367-368.
- [2] MAO W L, CHEN An-bang. New code delay compensation algorithm for weak GPS signal acquisition [J]. International Journal of Electronics and Communications (AEU), 2009, 63(8): 665-677.
- [3] JOVANOVIĆ V M. Analysis of strategies for serial-search spread-spectrum-code acquisition-direct approach [J]. IEEE Trans on Communications, 1988, 36(11): 1208-1220.
- [4] Van NEE D, COENEN A. New fast GPS code-acquisition technique using FFT [J]. Electronics Letters, 1991, 27(2): 158-160.
- [5] LECLERE J, BOTTERON C, FARINE P. Improving the performance of the FFT-based parallel code-phase search acquisition of GNSS signals by decomposition of the circular correlation [C]//Proc of ION GNSS. 2012: 1406-1416.
- [6] CHANG C F, HSIEH W H, KAO M S. A novel computationally efficient code phase acquisition method [C]//Proc of ION GNSS. 2011: 2113-2119.
- [7] STARZYK J A, ZHU Zhen. Averaging correlation for C/A code acquisition and tracking in frequency domain [C]//Proc of the 44th IEEE Midwest Symposium on Circuits and Systems. Ohio: IEEE Press, 2001: 905-908.
- [8] ZHU Zhen. Averaging correlation for weak global positioning system signal processing [D]. Ohio: Ohio University, 2002.
- [9] PSIAKI M L. Block acquisition of weak gps signals in a software receiver [C]//Proc of ION GPS. 2001: 2838-2851.
- [10] TSUI J B. Fundamentals of global positioning system receivers; a software approach [M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005: 138-330.
- [11] FANTINO M, MOLINO A, NICOLA M. An acquisition strategy suitable for software GNSS receiver [C]//Proc of ENC-GNSS. 2009: 1-8.

(上接第 1130 页)

参考文献:

- [1] BAUD L, NGUYEN P, BELLOT P. Robust overlay network with self-adaptive topology: protocol description [C]//Proc of IEEE International Conference on Digital Object Identifier. 2008: 154-160.
- [2] 周苗, 杨家海, 刘洪波, 等. Internet 网络拓扑建模 [J]. 软件学报, 2009, 20(1): 109-123.
- [3] AUGUSTIN B, FRIEDMAN T, TEIXEIRA R. Measuring load balanced paths in the Internet [C]//Proc of the 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. 2007: 149-160.
- [4] VIGER F, AUGUSTIN B, CUVILLIER X, et al. Detection, understanding, and prevention of traceroute measurement artifacts [J]. Computer Network, 2008, 52(5): 998-1018.
- [5] DONNET B, RAOULT P, FRIEDMAN T, et al. Deployment of an algorithm for large-scale topology discovery [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(12): 2210-2220.
- [6] LUCKIE M, DHAMDHARE A, CLAFFY K, et al. Measured impact of crooked traceroute [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(1): 14-21.
- [7] DONNET B, FRIEDMAN T, CROVELLA M. Improved algorithms for network topology discovery [C]//Proc of Passive and Active Measurement Workshop. New York: [s. n.], 2005: 149-162.
- [8] LUCKIE M. Scamper: a scalable and extensible packet probe for active measurement of the Internet [C]//Proc of Internet Measurement Conference. 2010: 239-245.
- [9] LUCKIE M. Scamper [EB/OL]. <http://www.wand.net.nz/scamper>.
- [10] Van JACOBSON. Traceroute [EB/OL]. <ftp://ftp.ee.lbl.gov/traceroute.Tar.gz>.
- [11] [EB/OL]. <http://code.google.com/p/paris-traceroute/>.
- [12] LUCKIE M, HYUN Y, HUFFAKER B. Traceroute probe method and forward IP path inference [C]//Proc of the 8th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. 2008: 311-324.
- [13] 王尚, 卢泽新, 彭伟, 等. 一种基于二分搜索的网络拓扑探测方法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(11): 4296-4298.