

GPS 中基于 P 码的快速直接捕获方法的研究^{*}

冯永新^{1,2} 刘芳^{2,3} 潘成胜^{2,3} 王光兴¹

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)¹ (沈阳理工大学通信与网络工程中心 沈阳 110168)²
(南京理工大学控制科学与工程系 南京 210094)³

摘要 GPS系统采用典型的CDMA体制,目前扩频PRN码主要是用于标准定位服务的C/A码和用于精确定位服务的P码,而P码的捕获通常是利用C/A码来完成的。为保证扩频信号具有更高的扩频增益、更强的抗模仿和抗欺骗能力,GPS接收机必须实现P码的直接捕获。本文从研究信号直接捕获算法角度出发,提出了一种新的P码快速直接捕获算法,结果表明,该算法较XFAST和均值法扩大了时间覆盖域,提高了捕获效率。

关键词 P码,XFAST,均值,相关,GPS

The Research of Fast Direct Acquisition Methods Based on P Code

FENG Yong-Xin^{1,2} LIU Fang^{2,3} PAN Cheng-Sheng^{2,3} WANG Guang-Xing¹

(School of Information Science and Engineering of Northeastern University, Shenyang 110004)¹

(Communication and Network Institute of Shenyang Ligong University, Shenyang 110168)²

(Department of Control Science and Engineering of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)³

Abstract As the typical CDMA application, the spread spectrum PRN codes in GPS are C/A code applied to standard positioning service and P code applied to precise positioning service presently. P code is usually acquired depending on C/A code. P code direct acquisition should be implemented in GPS receiver in order to achieve the higher spread spectrum gain, the better anti-deception and anti-spoofing. A new P code direct acquisition algorithm is proposed by studying signal direction acquisition algorithms. The results have shown that the new algorithm has wider time covering field of code acquisition than XFAST and average method as well as improves the acquisition efficiency.

Keywords P code, XFAST, Average method, Correlation, GPS

1 引言

全球定位系统GPS(Global Positioning System)^[1]是美国继阿波罗登月、航天飞机之后的第三大航天工程,是实现全球、全天候、实时、连续导航定位的新一代高精度天基导航系统,其导航能力与作用已经远远超越了激光制导、惯性制导等其它定位与导航技术。

GPS系统采用典型的CDMA体制,这种扩频调制信号具有低截获概率特性,系统以码分多址形式区分各卫星信号,采用的伪随机序列PRN^[2]码主要有C/A码、P码、Y码以及GPS现代化中提出的M码,Y码是P码经AS政策实施的加密码。目前,GPS信号的扩频PRN码主要是用于标准定位服务的C/A码和用于精确定位服务的P码。作为用户接收机,则利用伪随机序列的良好自相关性和互相关性,对信号进行相关接收、分离和接收所需的不同卫星信号,进而完成测距和定位。

在未来的战争中,导航战必然是战争双方争夺的焦点之一。GPS系统中P码的捕获通常是利用C/A码来完成的,用户首先捕获到C/A码,然后利用C/A码调制的导航电文中的握手字(HOW-handoverword)所提供的信息对P码进行捕获。与P码相比,C/A码元长度短、速率低,易受干扰和欺骗,在强

干扰和欺骗的战争环境下,是否还能通过C/A码来捕获到P码必然成为问题。扩频码使用长周期高速PRN码,可以保证扩频信号具有更高的扩频增益、更强的抗模仿和抗欺骗能力,但同时也大大增加了其快速直接捕获的难度。尽管目前P码只能为美国军方及其特许用户使用,但是研究码的捕获技术对未来我国发展自己的卫星定位系统有着重要的意义。

就直接捕获长周期P码技术而言,虽然必须依靠原始长PRN码的相关检测捕获技术^[3],但通过接收机时钟和捕获能力等方面可以进行改进,一方面提高接收机时钟性能,并引用先进的时间及频率预测技术,尽可能缩短搜索范围;另一方面提高捕获电路的工作效率,尽可能提高码不确定范围的搜索速度,包括大规模并行相关器件、发展先进的捕获信号处理算法等等。本文从信号直接捕获算法研究的角度出发,来提高P码的捕获效率。

2 P码与直接相关捕获

目前GPS系统是部分公开的,主要利用直接序列扩频调制技术,采用1.023MHz(C/A码)和10.23MHz(P码)两种速率的伪随机码在 L_1 和 L_2 频率上调制发射50Hz的导航定位信息, L_1 和 L_2 频率在和平时期是确知的,分别为1575.42MHz和1227.6MHz,其中 L_1 频率上的信号是非平衡

^{*}国家863课题(2005AA712061)和武器装备重点基金(6140431)资助。冯永新 副教授,博士后,主要研究方向:扩频通信技术及应用,无线网络;刘芳 博士研究生,主要研究方向:扩频通信技术及应用,数字信号处理;潘成胜 教授,博士生导师,信息对抗,网络管理;王光兴 教授,博士生导师,研究方向:移动无线网络技术。

QPSK 调制,其 I 通道上的伪码序列是 C/A 码,其 Q 通道的伪码序列是 P 码; L_2 频率上采用 P 码扩频的 BPSK 调制,如图 1 和式(1)所示。(1)式中 A_p 、 A_c 和 B_p 分别为载波 L_1 、 L_2 的振幅, $P_i(t)$ 、 $G_i(t)$ 和 $D_i(t)$ 分别为第 i 颗卫星的 P 码、C/A 码和导航电文 D 码, ω_1 、 ω_2 分别为载波 L_1 、 L_2 的角频率, φ_{1i} 和 φ_{2i} 分别为第 i 颗卫星载波 L_1 、 L_2 的初始相位。GPS 系统不断进行改进,其措施包含在 L_2 上增加 C/A 码、增加新的频率和 PRN M 码等。

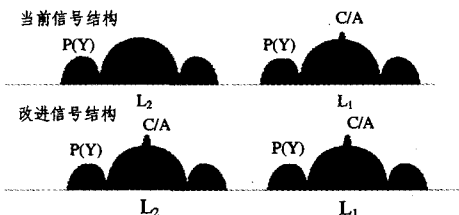


图 1 GPS 信号

$$\begin{cases} S_{i_1}(t) = A_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_{1i}) \\ \quad + A_c G_i(t) D_i(t) \sin(\omega_1 t + \varphi_{1i}) \\ S_{i_2}(t) = B_p P_i(t) D_i(t) \cos(\omega_2 t + \varphi_{2i}) \end{cases} \quad (1)$$

P 码^[2] 是复杂的 PRN 码,序列长度为 $15345000 \times 15345037 = 2.357 \times 10^{14}$,速率为 10.23MHz,序列周期为 266.41 天,其中,每颗 GPS 卫星使用序列的一个星期,故每个序列长度是 6.187×10^{12} ,该码元长度远远大于周期为 1ms 的 C/A 码 1023 的码元长度。

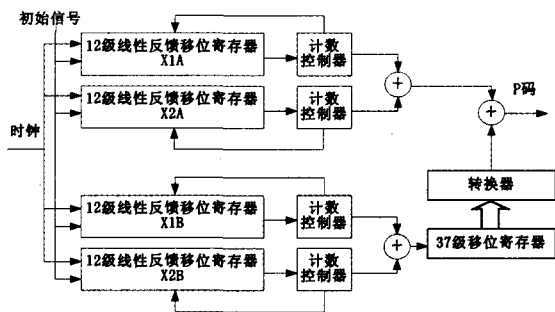


图 2 P 码产生原理图

P 码产生原理图如图 2 所示,主要由四个 12 级线性反馈移位寄存器(X1A、X1B、X2A、X2B)构成,系统中有一个统一的时钟频率 10.23MHz。X1A 和 X2A 产生一个 m 序列,X1B 和 X2B 产生另一个 m 序列。X1A 和 X2A 每周产生 4092

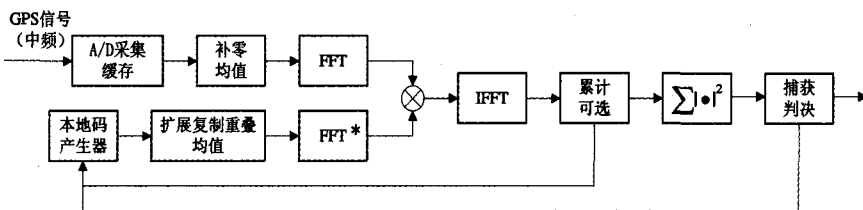


图 3 P 码捕获功能框图

Step1 将接收的 GPS 信号(经中频处理)以适当速率、载波频率进行 A/D 采集、缓存。

Step2 依据 P 码的产生机理,生成本地 PRN 码。

Step3 选取长度为 L 的接收 P 码样本,记作 $G':\{g'_1, \dots, g'_L\}$;对 G' 进行补零处理,产生新的样本 $G'':\{g''_1, \dots, g''_L, g''_{L+1}, \dots, g''_{2L}\}$,其中 $g''_{L+1}, \dots, g''_{2L} = 0$;将 G'' 平均分成 $2k$ 段,每段 i 个,进一步进行每 i 个值的平均运算,从而获得长度为 $2k$ 的新样本序列,记作:

个码片的截短码, X1B 和 X2B 每周产生 4093 个码片的截短码。X1A 和 X1B 的输出进行模 2 和得到 X1 序列。以相同的原理,由 X2A 和 X2B 的输出进行模 2 和产生 X2 序列。X2 序列经由一个移位寄存器(选择范围为 1 到 37)得到 X2i 序列,P 码就是由 X1 和 X2i 组成的模 2 和的复合码。

就直接序列扩频通信而言,其 PRN 序列的搜捕通常采用相关方法,为提高计算速度,又通常基于 FFT^[4] 方法。随着 PRN 码复杂性的增加,为有效的码搜捕算法也提出了挑战。就 P 码的长周期、特殊码元长度而言,如何提高算法的效率是必须解决的问题。理论与实践证明,频域 FFT 非常适合于 C/A 码的直接捕获,但针对 P 码而言,并不能直接应用进行逐位搜索,尚需与其他方法相结合。就 P 码的直接捕获而言,较好的方法主要有扩展复制重叠 XFAST(Extended Replica Folding Acquisition Search Technique)^[5,6] 算法和均值法^[7]。

XFAST 方法是建立在被捕获伪码的优良自相关特性基础上,码的自相关性能越好,则处理效率越高。即:将一个长伪码划分为 M 个子段,每段长 L 点,并将各子段的对应位置进行相加运算,产生一个新的长为 L 点的重叠码段。处理后,一个 L 点的码段可以包含 ML 点长码段的信息,从而扩展了一次捕获操作的搜索范围,因此称之为扩展复制重叠捕获。该方法利用码的子序列互相关特性,由于原来未叠加的码片和那些从其它区段叠加过来的码片互相关很小,因此产生很小的背景噪声,在轻微降低信噪比和产生峰值多值性的代价下,使用码叠加可以加快计算;但是,重叠各个子码段的处理,也影响到了各个子码段间的互相关特性,同时, M 和 L 的选取也将对相关峰值检索产生一定影响。

均值法是以循环相关的理论为基础而提出的一种快速 P 码直接捕获算法,它不仅采用循环相关的方法扩大了搜索的时间覆盖域,而且通过分段补零的方法很好地实现了频域的码多普勒频移补偿。但是,如果平均的码段越长,它的码相位偏移就会越大,峰值检索的性能越差,因此平均的码段长度不能过长,也就限制了时域的检索范围。

3 一种新的快速直接捕获算法

为了进一步提高 P 码的捕获效率,我们在将 XFAST 和均值法进行有机结合的基础上,并设置累计处理,提出了一种新的基于 P 码的快速直接捕获算法,图 3 为捕获功能框图。

$$G: \{g_1, \dots, g_p, \dots, g_{2k}\} (g_p = \frac{1}{i} \sum_{j=(p-1) \times i + 1}^{p \times i} g'_j)$$

Step4 选取长度为 $M \times 2L$ 的本地伪码序列,以每段为 $2L$ 个样本的大小进行复制重叠,记作 $F': \{\bigcup_{j=1}^M [f'_{j,1}, \dots, f'_{j,2L}]\}$,重合部分进行算术相加;同理,对 F' 进行每 i 个样本的均值运算,获得长度为 $2k$ 的新的本地伪码序列,记作:

$$F: \{f_1, \dots, f_p, \dots, f_{2k}\} (f_p = \frac{1}{i} \sum_{j=(p-1) \times i + 1}^{p \times i} \bigcup_{l=1}^M f'_{jl})$$

Step5 进行 G 的 FFT 运算。

Step6 进行 F 的 FFT 运算,并取复共轭。

Step7 将 Step5 和 Step6 的结果进行乘法运算,完成 IFFT。

Step8 截取 Step7 中的前 k 个值,即为本地伪码与接收到的 GPS 信号中 P 码的相关值。

Step9 该处理过程又称相关累计过程,为可选操作项,暂不进行捕获判决,从而避免捕获判别开销。相应地,移动本地产生的伪码序列,产生新的长度为 $M \times 2L$ 的本地样本,重复 Step4 至 Step8;重复次数设定为 l ,并对结果求和。

Step10 进行相关峰值的捕获判决,若结论为否,则选取新的本地码重复 Step4 到 Step9 的运算。

Step11 若符合相关峰值判决,则记录当前最大值所在序列的位置 m ,为增加码的搜索范围,提高捕获效率,我们对接收的 P 码信号和本地伪码进行了如扩展复制重叠、均值的处理,因此最大相关峰值对应的位置 m ,是一个相对序列位置,必须通过“去除模糊度”操作,获得确切的峰值产生地。“去除模糊度”包含“去除重叠模糊度”和“去除均值模糊度”。

Step11 “去除重叠模糊度”的目的在于判定该相关峰值出自第几个重叠子段。即:对应于进行重叠的 M 段本地伪码

序列,分别与接收码进行相关运算,获得产生真实相关峰值的子码段。

Step12 “去除均值模糊度”的目的在于判定最终的最大相关峰值样本发生地。即:将接收的 P 码样本延正方向(序列点序号增加的方向)移动 $(m-1) \times i$,得到新的样本序列 $G'_1: \{g'_1, \dots, g'_L\}$,截取 G'_1 中的前 $2L1$ 个样本点,构成新的样本序列在 $G_1: \{g_1, \dots, g_{2L1}\}$,对 G_1 进行 FFT;在产生真实相关峰值的本地子码段样本序列中,截取前 $L1$ 个样本,形成序列 $F'_1: \{f'_1, \dots, f'_{L1}\}$,对 F'_1 进行补零处理,构成长度为 $2L1$ 的本地新序列 $F_1: \{f_1, \dots, f_{L1}, 0, \dots, 0\}$,对 F_1 进行 FFT 运算,并取复共轭;将上述结果进行乘法运算,完成 IFFT,设此时峰值产生地为 $m1$,于是可以获得最终的确切相关峰值位置,即: $m \times i + m1 - i$ 。

4 算法评估

在 Windows 平台环境下,通过 MATLAB 对本文的新算法、扩展复制重叠算法和均值法进行了仿真,就 P 码的产生机理而言,遵照 GPS-ICD-200 来实现。

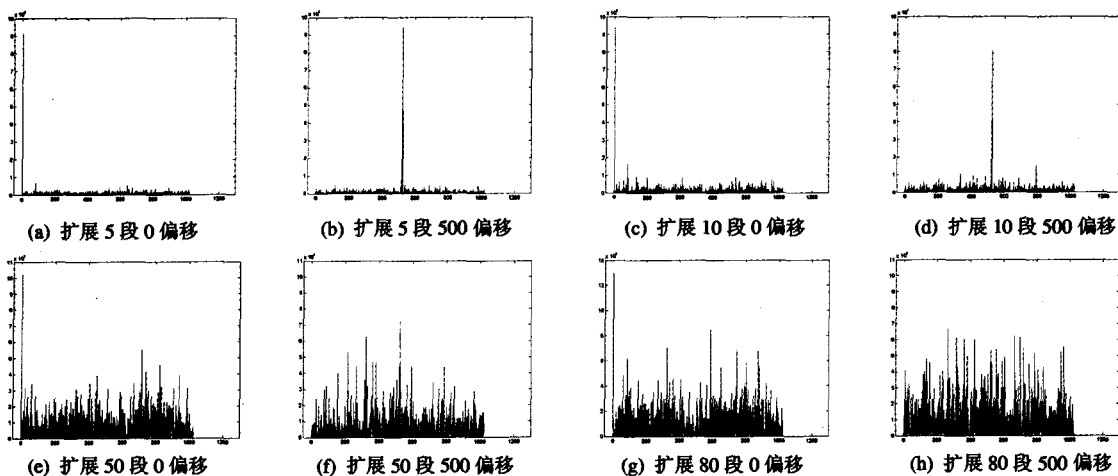


图 4 XFAST 循环相关

就 XFAST 算法而言,段内样本点数 $L=1024$,当扩展复制段数 M 为 5、10、50、80 时,循环相关后的相关峰值如图 4 所示,其中复制叠加段数 M 为 5、10 时,无论本地码与接收码是否发生临界偏移,都能够实现显著的峰值捕获;而当段数

M 逐渐增至 50 时,码间无偏移仍可以进行峰值捕获;但发生码间偏移时,虽然具有正确捕获点的最高峰值,但已近模糊;而当 M 为 80 时,只要发生码间偏移,即一次搜索样本点为 $M \times L=80 \times 1024=81920$ 时,已经无法正确检测了。

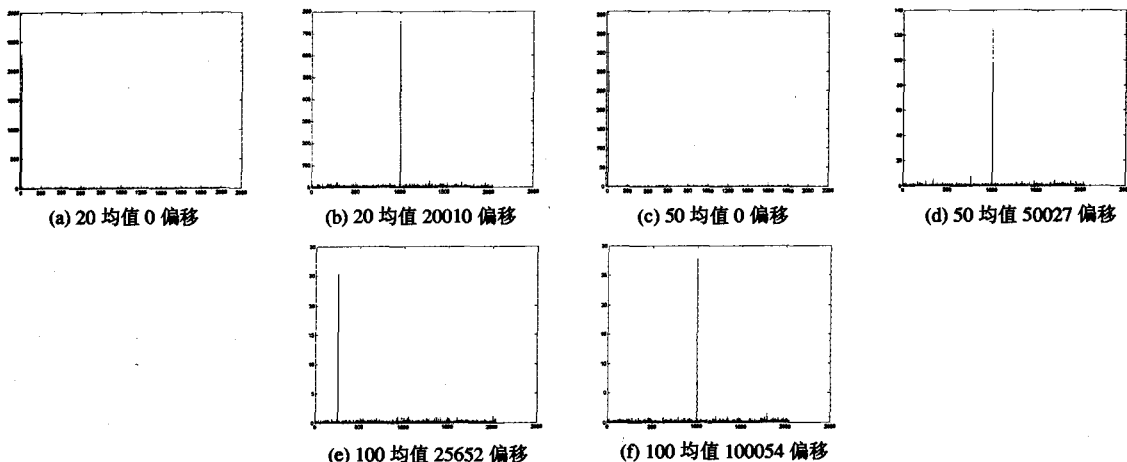


图 5 均值法循环相关

就均值法而言,当 i 为 20、50、100 时,循环相关后的峰值如图 5 所示。同理,考虑码间发生偏移,近于临界状态下, i 为 20、50 时最高峰值显著,可以实现正确判别捕获;随着均值 i 增多至 100,一次搜索样本点为 $i \times 2L = 100 \times 2048 = 204800$

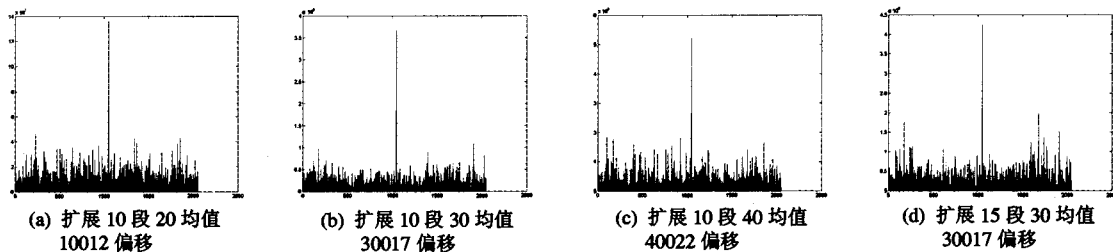


图 6 本文算法循环相关

10, $i=40$ 和 $M=15, i=30$ 时,相关峰值如图 6 所示。在码间偏移临界状态下,峰值显著,可正常定位。在一次搜索样本点达到 $M \times 2L \times i = 15 \times 2048 \times 30 = 921600$ 时,相比扩展复制重叠和均值法,在时间覆盖范围上分别提高 11~12 倍、4~5 倍以上,从而提高了 P 码的捕获效率。

结论 为实现 P 码的快速直接捕获,本文从研究信号直接捕获算法角度出发,提出了一种新的 P 码快速直接捕获算法,从而提高了捕获效率,对发展我国自己的卫星定位系统提供了技术基础。

参考文献

- 1 Kaplan E D. Understanding GPS, Principles and Applications [M]. Artech House, Boston, MA, 1996
- 2 ICD-GPS-200. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User

时,尽管存在峰值,但在临界点模糊,即:图 4(e)中,最高峰值为 25.309,次峰值为 24.293;图 4(f)中,最高峰值为 27.760,次峰值 24.368,从而导致进行相关检测困难。

就本文新算法而言,当 $M=10, i=50, M=10, i=30, M=$

- Interfaces (Public Release Version)[R]. ARINC Research Corporation, Fountain Valley CA, 1991
- 3 任亚安,王鹏,许卫东,等. GPS 中 P(Y)码直接捕获技术的研究进展[J]. 全球定位系统, 2003(1):2~7
- 4 Yang C. Fast Code Acquisition with FFT and its Sampling Schemes[A]. In: Proceedings of the 1996 National Technical Meeting[C], USA, 1996. 1729~1734
- 5 Yang C, Vasquez J, Chaffee J. Fast Direct P(Y)-Code Acquisition Using XFAST[A]. In: Proceedings of ION GPS-99[C], Nashville, 1999. 317~324
- 6 Yang C, Chaffee J, Abel J, Vasquez M. Extended Replica Folding for Direct Acquisition of GPS P-Code and Its Performance Analysis[A]. In: Proceedings of ION GPS 2000[C], Salt Lake City, 2000. 2070~2078
- 7 Pang J. Direct Global Positioning System P-Code Acquisition Field Programmable Gate Array Prototyping[D]. 2003. <http://www.lib.umi.com/dissertations/fullcit/>

(上接第 58 页)

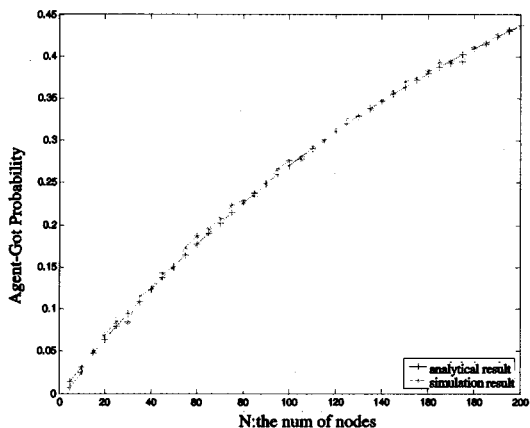


图 3 节点密度的影响

总结 本文给出了一种单小区一跳环境下分析代理搜索问题的模型,首次对混合网络中的代理搜索问题进行了解析分析,引入代理搜索成功概率作为分析代理搜索问题的目标函数。并通过节点通信半径、节点密度和小区半径等不同参数对代理搜索成功概率影响的仿真实验验证了文中提出解析表达式的准确性。

参考文献

- 1 Wu Hongyi, Qiao C, De S, Tonguz O. Integrated Cellular and Ad Hoc Relaying Systems; iCAR. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001,19(10): 2105~2115

- 2 3GPP. Opportunity Driven Multiple Access (ODMA); [Tech. Rep. 3G TR25.924 v1.0]. 1999
- 3 Aggélou G N, Tafazolli R. On the Relaying Capability of Next-Generation GSM Cellular Networks. IEEE Personal Communications, Feb. 2001. 40~47
- 4 Hsieh H-Y, Sivakumar R. Sphinx; A Hybrid Network Model for Wireless Packet Data Networks; [GNAN Research Group Technical Report 01-01]. January 2001
- 5 Zadeh A N, Jabbari B, Pickholtz R, Vojcic B. Self-organizing packet radio ad hoc networks with overlay (SOPRANO). IEEE Communications Magazine, June 2002,40:149~157
- 6 Luo H, Ramjee R, Sinha P, Li L, Lu S. UCAN; A Unified Cellular and Ad hoc Network Architecture. MOBICOM

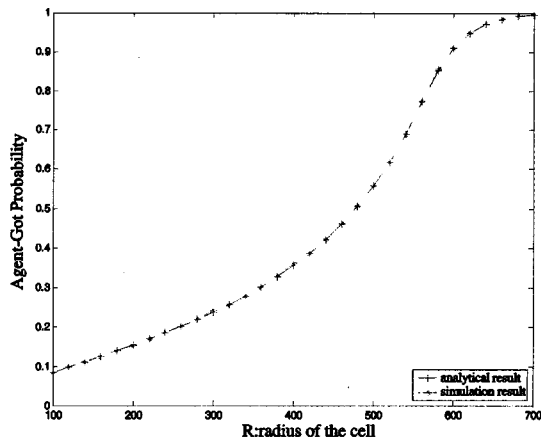


图 4 小区半径的影响