

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0103- 06

## 一种新的基于重复共轭对称结构前导的 OFDM 同步算法\*

石峰<sup>1,2</sup>, 王晨<sup>2</sup>, 周柱<sup>1</sup>, 张尔扬<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:** 针对基于重复共轭对称结构前导的 OFDM 系统, 提出了一种延迟相关与对称相关相结合的符号同步新算法, 在搜索出定时度量峰值位置的基础上, 使用固定门限搜索出第一条路径。理论分析表明该方法可以实现性能良好的符号同步。在静态多径信道和 6 径典型市区信道条件下对新提出的算法进行了仿真, 仿真结果表明所提算法可有效抑制传统的基于对称定时度量同步算法中存在的定时位置偏移, 获得准确的定时性能。

**关键词:** 延迟相关; OFDM; 对称相关; 同步

**中图分类号:** TN929.5      **文献标识码:** A

## A New Timing Synchronization Method for OFDM Systems Based on Repeated-Conjugated-Symmetric Preamble

SHI Feng<sup>1,2</sup>, WANG Chen<sup>2</sup>, ZHOU Zhu<sup>1</sup>, ZHANG Er-yang<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Engineering Institute, Airforce Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** A new timing synchronization method for OFDM systems based on repeated-conjugated-symmetric preamble was proposed. The proposed timing method utilized delayed correlation and symmetric correlation to search the first tap of multipath channel with the fixed threshold after the peak position of timing metric was detected. Theoretic analysis shows that the proposed method can achieve good performance of timing synchronization. Simulation results in static multipath channel and 6-path channel for typical urban show that the proposed method prevents the timing synchronization from moving backward and achieves more accurate timing result than conventional timing synchronization method based on conjugated-symmetric timing metric.

**Key words:** delayed correlation; OFDM; symmetric correlation; synchronization

OFDM 技术具有较强的抗衰落能力和频谱效率高等优点, 目前已得到广泛应用, 并且成为新一代移动通信的技术核心。但对同步误差敏感是影响 OFDM 系统性能的一个主要因素, 目前已有许多基于前导的同步算法被提出<sup>[1-10]</sup>。其中, 基于延迟相关的方法<sup>[1]</sup>易于实现, 但因定时度量曲线不够尖锐, 很难获得准确的定时; 基于本地序列相关的方法<sup>[2-3]</sup>具有较高的定时同步精度, 但受频偏限制较大; 在基于对称相关的方法<sup>[4-10]</sup>中, 基于共轭对称结构前导的同步消除了频偏的影响, 能实现准确定时和较大范围的频偏估计。

目前 OFDM 系统的同步研究和应用中, 具有共轭对称结构的前导有两种: 一种是整个前导具有单一的共轭对称结构<sup>[5]</sup>, 另一种是同时具有共轭对称和前后重复的双重结构<sup>[6-9, 11]</sup>。文献[10]在共轭对称结构的基础上引入了相位旋转, 是第二种前导的一种推广。文献[5]中基于单一共轭对称结构前导的同步算法中, 小数倍频偏的估计精度受循环前缀长度的制约。文献[12]对基于单一共轭对称前导的同步算法进行了分析, 指出在不存在功率很强的主径的多径信道条件下, 定时估计精度会下降。对于具有重复共轭对称结构的前导, 文献[6-7]利用整个前导的共轭对称性构造定时度量, 文献[8-9]利用前导半数长度序列的共轭对称性构造定时度量, 均能产生尖锐的定时度量。文献[10]使用延迟相关和对称相关的乘积作为定时度量, 并采用固定值作为初始门限, 在检测到定时度量超过预设门限时, 对前后两个相

\* 收稿日期: 2010- 10- 09

作者简介: 石峰(1976-), 男, 讲师, 博士生。

邻区域中定时度量的最大值进行比较,取较大值所在区域中相应的位置作为最终定时结果,巧妙地解决了定时度量次峰引起的定时模糊问题,在低信噪比时可获得比文献[6]更好的定时性能,但仍存在定时偏移的现象,且初始门限值需通过仿真确定,限制了该方法在实际信道中应用。

本文提出了一种延迟相关与对称相关相结合的定时同步新算法,在采用固定门限的条件下可进行有效的符号同步。和已有的方法相比,所提出方法的定时精度进一步提高,且易于实现。频率同步可利用前导的前后重复结构采用传统方法实现,本文内容主要集中在符号同步上。

## 1 OFDM系统概述

我们考虑用 $N$ 点IFFT实现包含 $N$ 个子载波的OFDM调制的系统,其中 $K+1$ 个子载波用于传送数据,假设采用理想的Nyquist脉冲成形,则发射端基带OFDM信号的采样可以表示为

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-K/2}^{K/2} a_k \exp(j2\pi kn/N), \quad -G \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

其中, $a_k$ 表示调制在第 $k$ 个传输子载波上的数据符号, $G$ 是保护间隔对应的采样数, $j = \sqrt{-1}$ 。

在接收端,存在载波频偏、采样钟误差和符号同步偏移。通常,载波频偏和符号同步偏移的影响是主要的,采样钟的偏差一般很小,所以可以假设系统收发两端采样钟完全同步,仅存在定时偏移和频率偏移,则接收端信号的采样为

$$r(n) = \exp(j2\pi f n/N) \sum_{i=0}^{L-1} h_i s(n - \varepsilon - \tau_i) + w(n) \quad (2)$$

其中 $f$ 表示对子载波间隔归一化的载波频偏, $L$ 为总的路径数, $h_i$ 表示第 $i$ 条路径的复增益, $\tau_i$ 为对应的路径延时, $\varepsilon$ 表示对采样周期归一化的符号定时偏移, $w(n)$ 表示均值为0、方差为 $\sigma_w^2$ 的加性高斯白噪声采样。假设信道冲激响应在至少一个OFDM符号持续时间内保持不变,且所有路径的平均总能量归一化为1,并假设最大的路径延时不超过 $G$ 。设信号 $s(n)$ 的平均功率为 $\sigma_s^2$ ,则平均信噪比(SNR)为 $\sigma_s^2/\sigma_w^2$ 。

## 2 新的符号同步算法

### 2.1 同步算法

新提出的同步算法充分利用前导结构上的重复特性和共轭对称特性,利用延迟相关设计出搜索窗开关度量,在搜索窗开启范围内首先搜索出定时度量的峰值位置,并在此基础上向前一定范围搜索出定时度量超过一定门限的位置作为最终的定时位置。

搜索窗开关度量设计为

$$M_{\text{search}}(d) = \frac{1}{N_{\text{ave}}} \sum_{i=0}^{N_{\text{ave}}-1} M_{\text{delay}}(d-i) \quad (3)$$

其中,

$$M_{\text{delay}}(d) = |P_{\text{delay}}(d)|^2 / \left[ R_{\text{delay}}(d) \right]^2 \quad (4)$$

$$P_{\text{delay}}(d) = \sum_{k=0}^{N_{\text{cor}}-1} r^*(d+k) r(d+k+N/2) \quad (5)$$

$$R_{\text{delay}}(d) = \sum_{k=0}^{N_{\text{cor}}-1} |r(d+k+N/2)|^2 \quad (6)$$

其中 $d$ 表示延迟相关窗内第一个采样的时间序号, $N_{\text{ave}}$ 为用于平均运算的延迟相关度量的个数, $N_{\text{cor}}$ 为前后每段用于相关的数据长度。这里取 $N_{\text{ave}} = G/2$ , $N_{\text{cor}} = \lceil (N+G)/2 \rceil$ 。式(5)、(6)可以用迭代的方法计算。

定时度量采用传统的共轭对称相关定时度量

$$M(d) = |P(d)|^2 / \left[ R(d) \right]^2 \quad (7)$$

其中,

$$P(d) = \sum_{k=0}^{L-1} r(d+L-k) \cdot r(d+L+k) \quad (8)$$

$$R(d) = \sum_{k=0}^{L-1} |r(d+L+k)|^2 \quad (9)$$

其中对称相关滑动窗的长度为  $2L$ , 这里取  $L = N/2$ 。式(9)也可以用迭代的方法进行计算。

基于重复共轭对称结构前导的 OFDM 符号同步新算法具体可描述为以下三个步骤:

步骤 1: 将搜索窗开关度量  $M_{\text{search}}(d)$  与预先设定门限  $T_{h1}$  比较, 当大于  $T_{h1}$  时, 开启搜索窗, 开始对定时度量  $M(d)$  进行比较, 存储定时度量较大的位置;

步骤 2: 搜索窗开启后, 当搜索窗开关度量  $M_{\text{search}}(d)$  小于门限  $T_{h1}$  时, 关闭搜索窗, 停止对定时度量的比较, 此时所存储的定时度量较大的位置就是搜索窗内定时度量  $M(d)$  的峰值位置;

步骤 3: 在搜索窗开启范围内, 从定时度量峰值位置向前  $N_{\text{pre}}$  点开始向后搜索, 将  $M(d)$  大于预定门限  $T_{h2}$  的点确定为最终的定时位置。若找不到满足条件的点, 则取  $M(d)$  的峰值位置作为最终的定时位置。

## 2.2 算法性能分析

根据以上介绍可知, 新提出的算法是在搜索窗开启范围内进行的, 因此搜索窗的开启控制很重要。同时, 门限  $T_{h2}$  的适当选取是决定该算法定时性能优劣的关键。

### 2.2.1 搜索窗开关度量的分析

在形式上, 式(4)和文献[1]中的定时度量相同, 但在式(5)中用于相关的每段数据的长度大于传统方法中的长度, 因此前后相关的两段数据有部分重叠。根据文献[1]中的分析可知, 在正确的定时点上  $M_{\text{delay}}$  可近似为高斯分布, 且有

$$M_{\text{delay}}(d_{\text{opt}}) \sim N(\mu_M, \sigma_M^2) \quad (10)$$

其中,

$$\mu_M = \mu_q^2 \quad (11)$$

$$\sigma_M^2 = 4\mu_q^2\sigma_q^2 \quad (12)$$

$$\mu_q = \sigma_s^2 / (\sigma_s^2 + \sigma_w^2) \quad (13)$$

$$\sigma_q^2 = \frac{\left(1 + \mu_q^2\right) \sigma_s^2 \sigma_w^2 + \left(1 + 2\mu_q^2\right) \sigma_w^4}{2N_{\text{cor}} \left(\sigma_s^2 + \sigma_w^2\right)^2} \quad (14)$$

在前导符号之外, 则有

$$M_{\text{delay}}(d_{\text{outside}}) \sim \frac{1}{2N_{\text{cor}}} X_2^2 \quad (15)$$

由式(14)、(15)可知, 增加每段参与延迟相关运算的采样数目可有效减小  $M_{\text{delay}}(d_{\text{opt}})$  的方差, 同时减小  $M_{\text{delay}}(d_{\text{outside}})$  的均值和方差, 这是设计搜索窗开关度量时为降低漏检概率和误检概率采取的一个重要措施。另外, 由式(11)、(13)可知,  $M_{\text{delay}}(d_{\text{opt}})$  的均值是  $SNR$  的单调递增函数; 式(15)表明,  $M_{\text{delay}}(d_{\text{outside}})$  和  $SNR$  无关。因此, 在系统设计时, 可根据系统使用环境的大致情况, 适当选取尽可能小的  $SNR$  的值, 由式(10)~(15)对门限  $T_{h1}$  进行设置。现考虑  $SNR$  的最小值为 0dB 时的情况。当采用 1024 个子载波, 保护间隔长度为 96 时, 则当有前导出现时, 可求得  $M_{\text{delay}}(d_{\text{opt}})$  的均值为 0.25, 方差为  $6.14 \times 10^{-4}$ ; 当没有前导符号时,  $M_{\text{delay}}(d_{\text{outside}})$  的均值和标准差均为  $1.786 \times 10^{-3}$ 。如果将门限  $T_{h1}$  设为 0.16, 则前导符号出现时, 漏检的概率小于  $2 \times 10^{-4}$ ; 当没有前导出现时, 可求出  $M_{\text{delay}}(d_{\text{outside}})$  超过该门限的概率为  $1.22 \times 10^{-39}$ , 即为误检的概率。

特别地, 式(3)是对  $M_{\text{delay}}(d)$  的平均, 目的是对  $M_{\text{delay}}(d)$  进行平滑, 以有效抑制噪声对搜索窗开关控制的干扰, 进一步减小搜索窗开关度量的方差, 这是设计搜索窗开关度量时采取的第二个关键措施。

### 2.2.2 定时度量的分析

当共轭对称相关滑动窗内的数据无任何对称结构时,由式(8)可知  $P(d)$  是由相位随机分布的  $L$  项元素的累加和,所以,此时  $M(d)$  的分布和文献[1]中定时度量在训练符号之外的分布相同。由文献[1]中分析可知,定时度量  $M(d)$  的均值和方差分别为

$$E[M(d)] = 1/L \quad (16)$$

$$D[M(d)] = 1/L^2 \quad (17)$$

当第一径的共轭对称前导对准滑动窗时,  $P(d)$  的求和项中仅有该路径对应的各乘积项为同相相加,其余的求和项为随机相位,可视为噪声,因此  $|P(d)|$  可近似为一高斯变量<sup>[1]</sup>。类似参照文献[1]中对定时度量在训练符号位置上的分析,可求出此时定时度量的均值为

$$E[M(d_0)] = |h_0|^4 / (1 + 1/SNR)^2 \quad (18)$$

其中  $d_0$  表示第一条路径对准滑动窗时,滑动窗内第一个采样的时间序号。

比较式(16)和(18)可知,当

$$\left( \frac{|h_0|^4}{1 + 1/SNR} \right)^2 \gg 1/L \quad (19)$$

时,通过合理设置门限值,即可检测出该路径,且能保证发生误检的概率较小。

该算法对于第一径的搜索是在搜索窗内,在定时度量的峰值位置基础上向前一定范围内进行的。通常在OFDM系统设计时,要求保护间隔的长度大于最大的路径延迟,因此,不妨设  $N_{\text{pre}} = G$ 。当取  $N$  为1024,  $G$  为96时,若要求发生误检测的概率小于  $1 \times 10^{-3}$ ,则根据  $\chi_2^2$  的累积分布函数可以求出所需的  $\chi_2^2$  为22.94,对应定时门限  $T_{h2}$  为  $2.24 \times 10^{-2}$  s。在仿真时取  $T_{h2}$  为  $2.5 \times 10^{-2}$  s,则理论上对应的误检概率为  $2.65 \times 10^{-4}$ 。

图1给出了  $SNR = 5\text{dB}$  时,在6径典型市区(TU)信道<sup>[13]</sup>条件下的搜索窗开关度量<sup>[13]</sup>和定时度量相结合进行符号定时的示意图,图中也给出了门限曲线  $T_{h1}$  和  $T_{h2}$ 。图1中,在搜索窗开启范围内,定时度量的最大值位置为采样点4,而最终的定时位置为采样点0。

根据图1及以上分析,可知该算法具有以下特点:

- (1) 通过搜索窗开关度量控制搜索窗的开启与关闭,可以限制定时度量最大值的搜索范围,有利于最大值操作的实现,同时抑制数据符号对定时的影响;
- (2) 采用搜索窗开启范围内的定时度量最大值操作,有效避免了定时度量次峰的影响;
- (3) 在定时度量峰值位置基础上向前一定范围内搜索得到第一径,可有效避免 ISI; 同时共轭对称相关避免了基于伪随机(PN)序列搜索第一径方法<sup>[2]</sup>中存在的对频偏敏感的问题;
- (4) 在理论分析基础上采用固定门限,解除了文献[10]中固定初始门限需经仿真确定的限制,易于实现。

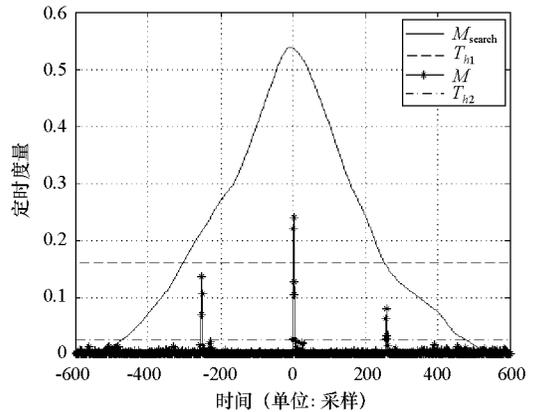


图1 SNR= 5dB 时, TU 信道条件下符号定时示例  
Fig. 1 Example of timing synchronization under TU channel, SNR= 5dB

## 3 仿真结果及分析

为验证新提出算法的性能,在不同信道条件下进行了仿真。为进行比较,也给出了文献[6-7]中根据定时度量峰值进行符号同步(以下称“方法1”)和文献[10]中同步方法(以下称“方法2”)的定时结果。系统参数设置为:系统带宽10MHz,子载波数目为1024,保护间隔长度为96,采样周期为100ns。采用两种信道模型:(1)静态多径信道A,各路径的功率和时延分别取值为6径TU信道<sup>[13]</sup>的平均功率和时延,其中各路径对采样周期的归一化时延分别为0、2、6、16、24和50;(2)6径TU信道<sup>[13]</sup>,考虑射频为2GHz,终端移动速度为16.67m/s(60km/h)。因为对称相关和延迟相关对频偏均不敏感,这里假设载波理想同步。实验时,在前导符号之前放置长度为256个采样的噪声序列。

表 1 给出了在静态多径信道 A 条件下, 三种同步算法定位在第 1 条路径上(对应采样点 0)的统计情况, 其中每个 SNR 上实验 3000 次, 每次取不同的前导和噪声。表 1 表明, 实验中方法 1 没有定位在第 1 条路径上的情况; 新算法定位在第 1 条路径上的次数远大于方法 2, 特别当  $SNR \geq 15\text{dB}$  时, 实验中新算法全部定位在第 1 条路径上。

表 1 静态多径信道 A 条件下定时位置统计与比较

Tab. 1 Statistics and comparison of timing position in static multipath channel A

SNR (dB)	定位在第 1 径上的次数 (对应于采样点 0)		
	方法 1	方法 2	新算法
0	0	2	35
5	0	13	874
10	0	301	2691
15	0	643	3000
20	0	808	3000
25	0	914	3000
30	0	898	3000

表 2 TU 信道条件下漏检情况统计

Tab. 2 Statistics of missing detection in TU channel

	SNR/dB						
	0	5	10	15	20	25	30
方法 1	0	0	0	0	0	0	0
方法 2	12	0	0	0	0	0	0
新算法	0	0	0	0	0	0	0

表 3 TU 信道条件下虚警情况统计

Tab. 2 Statistics of false detection in TU channel

	SNR/dB						
	0	5	10	15	20	25	30
方法 1	43	0	0	0	0	0	0
方法 2	1	3	70	150	197	193	212
新算法	0	0	0	0	0	0	0

表 2、3 和图 2 给出的是在 6 径 TU 信道条件下的实验结果, 其中每个 SNR 上实验 10<sup>4</sup> 次, 每次取不同的信道、前导和噪声。表 2 表明, 在  $SNR = 0\text{dB}$  时方法 2 出现了 12 次漏检现象(未检测出前导的出现), 占 0dB 时总实验次数的 0.12%。这是因为在时变信道条件下, 当各路径的能量均较小且噪声较大时, 方法 2 的定时度量太小, 以致未能超越设定的门限, 从而出现漏检现象。方法 1 和新算法均未出现漏检现象。表 3 给出的是三种同步方法发生虚警(定位在第一径之前, 或者最大路径延迟之后)的统计结果。实验中方法 1 仅在 0dB 时发生了 43 次虚警, 主要是在低 SNR 时产生的定时模糊; 方法 2 发生虚警的情况最为严重, 且在中、高 SNR 时的次数比低 SNR 时的要多, 这是因为在中、高 SNR 时, 方法 2 定时度量中的延迟相关部分在理想定时位置附近的值较大, 容易导致虚警。图 2 给出的符号定时估计均方误差(MSE)曲线表明, 新算法的性能最好; SNR 较低时, 方法 2 的性能好于方法 1, 但在中、高 SNR 时, 方法 2 的性能最差。这是因为方法 2 在中、高 SNR 时虚警次数较多, 而新算法则较好地抑制了定时模糊和定时偏移。

以上结果均表明, 新提出的同步方法可有效抑制传统的基于对称相关定时度量同步算法中存在的定时位置偏移, 获得准确的定时性能。

## 4 结论

本文提出了一种延迟相关与对称相关相结合进行 OFDM 符号同步的新算法。新提出的同步算法利用延迟相关设计出搜索窗开关度量, 利用对称相关作为定时度量。理论分析表明, 该方法可获得准确的定时性能, 且可以使用固定门限对多径信道的第一径进行搜索, 易于实现。仿真结果证实了分析的正确性。该同步算法适用于连续和突发 OFDM 系统的同步, 固定门限的方法也可适用于具有单一共轭对称结构前导的 OFDM 系统同步中。

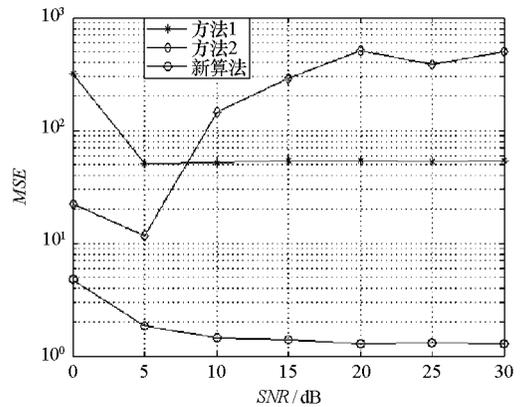


图 2 符号定时估计的均方误差曲线, 6 径 TU 信道  
Fig. 2 MSE performance of timing synchronization methods in TU channel with 6 taps

## 参考文献:

- [1] Schmidl T M, Cox D C. Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(12): 1613-1621.
- [2] 严春林. 正交频分复用系统中的同步技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 39-52.
- [3] 李加生, 尹锁柱, 邓茜. 基于 IEEE802.11a 的 OFDM 同步算法及 FPGA 实现[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(7): 117-119.
- [4] Zhang Z, Kayama H, Tellambura C. Joint Frame Synchronization and Carrier Frequency Offset Estimation in Multicarrier Systems [C]//IEEE Globecom, 2006: 1-6.
- [5] Guo Y, Liu G, Ge J. A New Time and Frequency Synchronization Scheme for OFDM Systems [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(2): 321-325.
- [6] Park B, Cheon H, Kang C, et al. A Novel Timing Estimation Method for OFDM Systems [J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 239-241.
- [7] Kim J J, Noh J H, Chang K H. Robust Timing & Frequency Synchronization Techniques for OFDM-FDMA Systems [C]//IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation, 2005: 716-719.
- [8] Wu M, Zhu W P. A Preamble-aided Symbol and Frequency Synchronization Scheme for OFDM Systems [C]//IEEE ISCAS, 2005: 2627-2630.
- [9] Manusani S K, Kshetrimayum R S, Bhattacharjee R. Robust Time and Frequency Synchronization in OFDM Based 802.11a WLAN Systems [C]//Annual IEEE India Conference, 2006.
- [10] Zhou E, Hou X, Zhang Z, et al. A Preamble Structure and Synchronization Method Based on Central-symmetric Sequence for OFDM Systems [C]//IEEE VTC, 2008: 1478-1482.
- [11] IEEE Std. 802.16a-2003. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems [S].
- [12] 田野, 谈振辉, 冯永新, 等. 基于共轭对称结构训练符号的 OFDM 同步算法性能分析[J]. 小型微型计算机系统, 2009, 30(6): 1240-1243.
- [13] GSM 05.05. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Radio Transmission and Reception [S].

(上接第 93 页)

## 参考文献:

- [1] Daley D J, Gani J. Epidemic Modeling: An Introduction [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999.
- [2] Staniford S, Paxson V, Weaver N. How to Own the Internet in Your Spare Time [C]//Proceedings of the 11<sup>th</sup> USENIX Security Symposium, 2002.
- [3] Frauenthal J C. Mathematical Modeling in Epidemiology [M]. New York: Springer-verlag, 1980.
- [4] Zou C C, Gong W, Towsley D. Code Red Worm Propagation Modeling and Analysis [C]//Proceedings of the 9<sup>th</sup> ACM Conference on Computer and Communication Security, 2002.
- [5] Chen Z, Gao L, Kwiat K. Modeling the Spread of Active Worms [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2003, 2003.
- [6] Andersson H, Britton T. Stochastic Epidemic Models and Their Statistical Analysis [M]. New York: Springer-verlag, 2000.
- [7] Weaver N, Paxson V, Staniford S, et al. A Taxonomy of Computer Worms [C]//Proceedings of ACM CCS Workshop on Rapid Malcode (WORM'03), 2003.
- [8] Zou C C, Gong W, Towsley D. On the Performance of Internet Worm Scanning Strategies [J]. Journal of Performance Evaluation, 2006, 63(7): 700-723.
- [9] Moore D, Shannon C, Brown J. Code-red: A Case Study on the Spread and Victims of an Internet Worm [C]//Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement, 2002.

(上接第 102 页)

## 参考文献:

- [1] Wehner D. High Resolution Radar [M]. Artech House, 1994.
- [2] 刘华林, 杨万麟. 基于 QR 分解的广义辨别分析用于雷达目标识别[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 205-208.
- [3] Kyung K, Dong S, Hyo K. Efficient Radar Target Recognition Using the MUSIC Algorithm and Invariant Features [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2002, 50(3): 325-337.
- [4] Currie N, Brown C. Principles and Applications of Millimeter-wave Radar [M]. Artech House, 1987.
- [5] 沈吉, 向锦武, 祁载康, 等. 目标运动对步进频率毫米波雷达锥扫测角的影响研究[J]. 电子学报, 2004, 32(6): 987-989.
- [6] 王桂丽, 李兴国. 频率步进和脉冲多普勒复合测速研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3): 190-192.
- [7] 李文臣, 王雪松, 王国玉. 机动目标一维距离像的展宽与补偿分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1364-1368.