

# 极低信噪比环境下含近邻约束的改进唐检测判决算法

马琳, 崔巍, 吴嗣亮

(北京理工大学雷达技术研究所, 北京 100081)

**摘要:** 极低信噪比环境下的伪码连续波测量雷达初始粗同步捕获过程中, 为了增加唐检测判决算法的灵敏度, 除门限条件外, 引入前后两次单次检测捕获的伪码相位估计值之差在一定范围内的近邻约束作为上/下行计数器值增减的条件。通过对唐检测判决过程建立马尔可夫链模型, 对引入近邻约束的改进唐检测算法的检测性能进行了理论分析与推导。仿真结果表明, 将近邻约束引入唐检测判决算法, 可以在检测概率几乎不变的情况下, 大幅度降低虚警概率, 即改进算法明显地增强了对微弱信号的检测能力, 且检测速度不受影响。

**关键词:** 测量雷达; 唐检测判决; 检测性能; 马尔可夫链; 转移概率

**中图分类号:** TN 914.42

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.13

## Improved Tong multiple trial algorithm with near neighbor constraint in extremely low SNR condition

MA Lin, CUI Wei, WU Si-liang

(Radar Research Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** For signal acquisition of measurement radar with pseudo-noise code modulated continuous wave in extremely low SNR condition, in order to enhance the sensitivity of Tong algorithm the pseudo-noise code phase differences between two single detections are introduced as near neighbor constraint within a certain range to decide the increase or decrease in value of up/down counter except the threshold condition. The mathematical model of Tong algorithm based on Markov chain is built to analyze the detection performance of improved Tong algorithm with near neighbor constraint. The simulation results show that this architecture can substantially reduce the probability of false alarm while the probability of detection remains almost unchanged, therefore, the detection ability is enhanced compared with the traditional Tong algorithm while the detection speed remains unaffected.

**Keywords:** measurement radar; Tong detector; detection performance; Markov chain; transition probability

## 0 引言

伪码连续波测量雷达作为空间交会对接过程的测量敏感器<sup>[1]</sup>, 用于精确测量追踪航天器与目标航天器之间的相对位置、相对速度和相对姿态, 在伪码和载波精确同步的条件下可以获得距离和速度的高精度测量值, 是交会对接测量系统的关键组成部分。对伪码相位和载波多普勒频率的初始粗同步过程称为捕获<sup>[2-3]</sup>, 能否快速、准确地给出伪码相位和多普勒频率的估计值是精确同步过程即跟踪的前提, 也是最终实现两航天器安全可靠对接的基础。

动态环境下的伪码捕获, 在时间和频率二维平面内进行搜索, 对检测单元利用单次驻留进行判决。在低信噪比环境下, 由于单次驻留判决虚警概率较高, 当检测到信号存在后, 要对宣布信号存在的单元利用多次驻留策略进行验证<sup>[4-5]</sup>, 验证阶段通过, 才最终宣布捕获成功。通常使用

M/N检测<sup>[6]</sup>或唐检测判决算法<sup>[6-7]</sup>来完成验证过程。唐检测判决算法(以下简称“唐检测算法”)是一种依序可变驻留时间的搜索检测算法, 它的计算量适中, 相比 M/N 检测算法具有更好的检测性能和更快的检测速度<sup>[6]</sup>, 因而得到广泛应用。

在测量雷达工作的初始阶段, 由于两航天器相对距离远, 接收信号极其微弱。此时, 可以通过增加唐检测算法的上行门限值来提高检测算法的灵敏度, 但所付出的代价是检测速度的降低<sup>[6]</sup>。若上行门限值保持不变, 在唐检测算法中引入近邻约束, 即将两次单次检测捕获的伪码相位估计值(以下简称“伪码相位”)之差在一定范围内, 作为上/下行计数器值增减的约束条件, 则可以大幅度压低虚警概率, 进而可以在总虚警概率满足要求的前提下, 通过降低检测门限, 提高检测概率。目前尚无文献就引入近邻约束后的唐检测算法性能变化情况这一问题进行过严格的理论推导

与定量分析。

文献[8]通过全概率公式推导出唐检测算法检测性能公式,修正了以往文献[6-7]中所使用的唐检测算法检测性能公式的错误。本文提出将唐检测算法建模为马尔可夫链,基于此数学模型,得到与文献[8]相同的无近邻约束的传统唐检测算法检测性能公式。在此基础上,推导出含近邻约束的改进唐检测算法检测性能公式。通过计算机仿真,与传统唐检测算法在检测性能和平均驻留次数两方面进行了比较,对理论推导的正确性及所做改进的有效性进行了验证。

### 1 唐检测判决算法的马尔可夫链模型

传统唐检测算法的处理流程如下:设上/下行计数器  $k$  初值为  $B$ ,上行门限为  $A$ ,本次单次检测结束后(单次检测指完成一次相关处理并得到伪码相位估计值及对应的检验统计量),若检验统计量超过判决门限, $k$  值加 1;反之, $k$  值减 1。当  $k$  值达到上行门限  $A$  时,宣布信号存在,唐检测过程结束;当  $k$  值减为 0 时,宣布信号不存在,唐检测过程亦结束。

实际上,可以用具有两个吸收态<sup>[9-10]</sup>的马尔可夫链<sup>[11-13]</sup>来描述唐检测算法的处理流程。马尔可夫链是一个离散随机过程,其定义包含一个状态集  $S, S = \{0, 1, \dots, m\}$ ,  $m$  为正整数;一个转移概率矩阵  $P, P$  中的元素  $p_{ij}$  为当前状态为  $i$  的条件下,下一个状态为  $j$  的概率,有  $i, j \in S$ 。对所有  $i, j \in S$ ,有  $0 \leq p_{ij} \leq 1$ ,以及  $\sum_{j=0}^A p_{ij} = 1$ ;又若  $p_{ii} = 1, p_{ij} = 0 (i \neq j)$ ,则称状态  $i$  为吸收态。唐检测器上/下行计数器  $k$  值的变化过程是一个随机序列  $K$ ,记  $k$  的初值为  $k_0$ ,第  $n$  次驻留的值为  $k_n (n = 1, 2, \dots)$ , $k$  在第  $n+1$  次驻留的值  $k_{n+1}$  仅与第  $n$  次驻留的值  $k_n$  有关,而与以前的状态无关,即满足:对任意的时刻  $n$ ,对任意的状态  $i, j \in S$ ,只要时刻  $n$  的状态为  $i$ ,不论过去发生了什么,也不论如何到达  $i$ ,下一个时刻转移到  $j$  的概率一定为

$$p_{ij} = p(k_{n+1} = j | k_n = i, k_{n-1} = i_1, \dots, k_0 = i_0) = p(k_{n+1} = j | k_n = i) \quad (1)$$

也就是说,随机序列  $K = \{k_n, n = 0, 1, 2, \dots\}$  具有马尔可夫链的特征。又当  $k = A$  或  $k = 0$  时,唐检测过程结束,所以  $A$  和  $0$  可看作两个吸收态。因此,唐检测算法上/下行计数器  $k$  的值可以用状态空间为  $S = \{0, 1, 2, \dots, A\}$ ,具有  $A$  和  $0$  两个吸收态的马尔可夫链来描述。

对于具有  $A$  和  $0$  两个吸收态的马尔可夫链,从状态  $i$  开始,到达吸收态  $A$  停止的概率  $a_i (i = 0, 1, \dots, A)$  可以通过下面的线性方程组<sup>[11]</sup>来求解:

$$\begin{cases} a_0 = 0, a_A = 1 \\ a_i = \sum_{j=0}^A p_{ij} a_j, i = 1, 2, \dots, A-1 \end{cases} \quad (2)$$

设由状态  $i$  到  $j = i+1$  的转移概率为  $p$ ,由状态  $i$  到  $j = i-1$  的转移概率为  $1-p$ ,则对应的转移概率矩阵  $P_1$  为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1-p & 0 & p & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-p & 0 & p & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)代入方程组(2)可解得

$$a_i = \frac{\left(\frac{1-p}{p}\right)^i - 1}{\left(\frac{1-p}{p}\right)^A - 1}, i = 1, 2, \dots, A-1 \quad (4)$$

从  $\{1, 2, \dots, A-1\}$  中选取唐检测算法上/下行计数器  $k$  的初值  $B$ ,概率  $a_i$  即为唐检测算法上/下行计数器  $k$  值从  $B$  开始,到达上行门限  $A$  停止,宣布信号存在的概率。将  $i = B, p = p_d$  代入式(4),此时  $a_i$  即为唐检测算法总检测概率  $P_D$ ,其中,  $p_d$  为  $H_1$  假设下(有目标存在)检验统计量大于门限且捕获的伪码相位正确的概率,称为单次检测概率。将  $i = B, p = p_{fa}$  代入式(4),此时  $a_i$  即为总虚警概率  $P_{FA}$ ,其中,  $p_{fa}$  为  $H_0$  假设下(仅有噪声)检验统计量大于门限的概率,称为单次虚警概率。 $P_D$  和  $P_{FA}$  分别如下<sup>[8]</sup>:

$$P_D = \frac{\left(\frac{1-p_d}{p_d}\right)^B - 1}{\left(\frac{1-p_d}{p_d}\right)^A - 1}, B = 1, 2, \dots, A-1 \quad (5)$$

$$P_{FA} = \frac{\left(\frac{1-p_{fa}}{p_{fa}}\right)^B - 1}{\left(\frac{1-p_{fa}}{p_{fa}}\right)^A - 1}, B = 1, 2, \dots, A-1 \quad (6)$$

### 2 含近邻约束的唐检测判决算法

伪码连续波测量雷达的捕获过程,不仅仅是判决目标有无的信号检测问题(通过检验统计量是否过门限来判决),还要对伪码相位和载波多普勒频率两个参数进行估计,以实现目标的精确测距和测速。在测量雷达工作过程中,当目标存在时,测量雷达前后两次捕获的伪码相位之差不应超过一定范围;而目标不存在时,由虚警导致捕获成功得到的伪码相位是随机的,前后两次捕获的伪码相位之差不超过一定范围的概率非常小。因此,在唐检测算法中引入前后两次捕获的伪码相位之差不超过一定范围作为判决时的约束条件,可以大大降低系统的总虚警概率,从而可以在总虚警概率满足要求的前提下,通过降低门限,达到提高唐检测算法灵敏度的目的。基于第 2 节中对唐检测算法建立的马尔可夫链模型,下面对含近邻约束的唐检测算法检测性能进行详细分析。

当上/下行计数器  $k$  值为 1 时,仅对检验统计量进行门限判决:若检验统计量大于门限, $k = k+1$ ;否则, $k = k-1$ 。当  $2 \leq k \leq A$  时,如果本次检测的检验统计量大于门限,且前后两次单次检测捕获的伪码相位之差在一定范围内, $k = k+1$ ;如果检验统计量小于门限,或者尽管检验统计量大于门限,但前后两次捕获的伪码相位之差不在规定范围内, $k = k-1$ 。

前后两次捕获的伪码相位之差的范围  $l$  由接收信号载波中的多普勒频率来确定。一个伪码周期内(设码周期为  $1 \text{ ms}$ ,含  $N$  个码片,)由多普勒频率引起的伪码相位偏差为  $\frac{Nf_d}{f_{up} + f_d}$ (单位:码片/ms),其中,  $f_d$  为多普勒频率;  $f_{up}$  为载波频率。设完成一次单次检测的时间为  $T \text{ ms}$ ,则在此时间

段内由多普勒引起的伪码相位偏差为  $\frac{TNf_d}{f_{up}+f_d}$  (单位:码片), 则有  $l = \lceil \frac{TNf_d}{f_{up}+f_d} \rceil$  ( $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整)。

需要说明的是, 当经过多次单次检测后,  $k$  值再次为 1 时, 仍仅对检验统计量进行门限判决, 而不对本次与上次捕获得到的伪码相位进行比较, 这样可以使状态  $i=1$  时的转移概率保持一致。

上/下行计数器  $k$  值从 1 开始, 到达上行门限  $A$  停止时, 含近邻约束的唐检测算法上/下行计数器  $k$  值变化的转移概率矩阵  $P_2$  为

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1-p & 0 & p & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1-p_{\text{cons}} & 0 & p_{\text{cons}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1-p_{\text{cons}} & 0 & p_{\text{cons}} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $p$  为检验统计量大于门限的概率;  $1-p$  为检验统计量小于门限的概率;  $p_{\text{cons}}$  为检验统计量大于门限且前后两次捕获的伪码相位之差在一定范围内的概率;  $1-p_{\text{cons}}$  为检验统计量小于门限或者尽管检验统计量大于门限, 但前后两次捕获的伪码相位之差不在规定范围内的概率。

从  $k=1$  开始, 到达  $k=A$  停止, 宣布信号存在的概率  $a_1$  可以通过下面的线性方程组来求解:

$$a_0 = 0 \quad (8)$$

$$a_A = 1 \quad (9)$$

$$a_1 = (1-p)a_0 + pa_2 \quad (10)$$

$$a_i = (1-p_{\text{cons}})a_{i-1} + p_{\text{cons}}a_{i+1}, i = 2, 3, \dots, A-1 \quad (11)$$

将方程(8)代入方程(10), 可得  $a_1 = pa_2$ 。

由方程(11)可得

$$(1-p_{\text{cons}})(a_i - a_{i-1}) = p_{\text{cons}}(a_{i+1} - a_i) \quad (12)$$

令  $\rho = \frac{1-p_{\text{cons}}}{p_{\text{cons}}}$  及

$$\delta_i = a_{i+1} - a_i, i = 2, 3, \dots, A-1 \quad (13)$$

代入式(12)则有  $\delta_i = \rho\delta_{i-1} (i = 2, 3, \dots, A-1)$ , 通过递推可得

$$\delta_i = \rho^{i-1}\delta_1, i = 2, 3, \dots, A-1 \quad (14)$$

当  $i$  取不同值时, 将式(13)两边进行累加, 可得  $\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{A-1} = 1 - a_1$ , 将式(14)代入其中, 可得  $\delta_1 = \frac{1-a_1}{1+\rho+\dots+\rho^{A-2}}$ 。由式(13)还可得  $a_i = \delta_{i-1} + a_{i-1} (i = 2, 3, \dots, A-1)$ , 当  $i$  取不同值时, 将等式两边进行累加, 可得

$$a_i = a_1 + (1+\rho+\dots+\rho^{i-2})\delta_1 = a_1 \frac{\rho^{i-1} - \rho^{A-2}}{1 - \rho^{A-1}} + \frac{1 - \rho^{i-1}}{1 - \rho^{A-1}}, i = 2, 3, \dots, A-1 \quad (15)$$

当  $i=2$  时,  $a_2 = a_1 \frac{\rho - \rho^{A-2}}{1 - \rho^{A-1}} + \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{A-1}}$ , 又  $a_1 = pa_2$ , 则

$$a_1 = \frac{2p_{\text{cons}} - 1}{p_{\text{cons}} \left( \frac{1}{p} - 1 \right) \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_{\text{cons}}} - 1 \right)^{A-1} \right] + 2p_{\text{cons}} - 1} \quad (16)$$

式(16)即为含近邻约束的上/下行计数器  $k$  初值为 1 的唐检测算法检测性能公式。

将  $p = p_d \cdot p_{\text{cons}} = p_d$  代入式(16), 即得到无近邻约束的唐检测算法总检测概率

$$a_1 = \frac{\left( \frac{1}{p_d} - 1 \right) - 1}{\left( \frac{1}{p_d} - 1 \right)^A - 1}$$

与式(5)中令  $B=1$  所得的总检测概率公式一致; 将  $p = p_{\text{fa}}, p_{\text{cons}} = p_{\text{fa}}$  代入式(16), 即得到无近邻约束的总虚警概率

$$a_1 = \frac{\left( \frac{1}{p_{\text{fa}}} - 1 \right) - 1}{\left( \frac{1}{p_{\text{fa}}} - 1 \right)^A - 1}$$

与式(6)中令  $B=1$  所得的总虚警概率公式一致, 由此证明了式(16)推导的正确性。

将  $p = p_d \cdot p_{\text{cons}} = p_d p_d$  代入式(16), 可得含近邻约束的唐检测算法上/下行计数器  $k$  初值  $B=1$  时的总检测概率

$$P_D = \frac{2p_d^2 - 1}{p_d(1-p_d) \left[ 1 - \left( \frac{1}{p_d^2} - 1 \right)^{A-1} \right] + 2p_d^2 - 1} \quad (17)$$

若求含近邻约束时的唐检测算法总虚警概率  $P_{\text{FA}}$ , 首先要求出在目标不存在的情况下, 前后两次捕获的伪码相位之差在一定范围内的概率  $p_{\text{esame}}$ 。设在一个相关处理周期内搜索的伪码相位个数为  $L$ , 前后两次捕获的伪码相位分别为  $\tau_i$  和  $\tau_j$ , 满足  $|\tau_i - \tau_j| \leq l$  成立的概率即为  $p_{\text{esame}}$ , 这即为在两个整数集合  $\phi_1$  和  $\phi_2 (\phi_1 = \phi_2 = \{0, 1, \dots, L\})$  中随机抽取两个数  $\tau_i$  和  $\tau_j$  且满足  $|\tau_i - \tau_j| \leq l$  的概率。由参考文献[14]中的结论可得  $p_{\text{esame}} = \frac{(1+2l)L-l^2-l}{L^2}$ , 则在信号不存在时, 检验统计量大于门限且前后两次捕获的伪码相位之差在一定范围内的概率为

$$p_{\text{cons}} = p_{\text{fa}} p_{\text{esame}} = p_{\text{fa}} \frac{(1+2l)L-l^2-l}{L^2} \quad (18)$$

将式(18)及  $p = p_{\text{fa}}$  代入式(16)可得含近邻约束的唐检测算法上/下行计数器  $k$  初值  $B=1$  时的总虚警概率

$$P_{\text{FA}} = \frac{2p_{\text{fa}}T - L^2}{(1-p_{\text{fa}})T \left[ 1 - \left( \frac{L^2}{p_{\text{fa}}T - 1} \right)^{A-1} \right] + 2p_{\text{fa}}T - L^2} \quad (19)$$

式中,  $T = (1+2l)L - l^2 - l$ 。

### 3 性能仿真与比较

#### 3.1 检测性能

设唐检测算法上/下行计数器  $k$  初值  $B=1$ , 上行门限  $A=5, L=128, l=0$ , 由式(5)和式(17)分别得到无近邻约束和含近邻约束的唐检测算法总检测概率  $P_D$  与单次检测概率  $p_d$  的关系曲线, 如图 1 所示; 由式(6)和式(19)分别得到无近邻约束和含近邻约束的唐检测算法总虚警概率  $P_{\text{FA}}$  与单次虚警概率  $p_{\text{fa}}$  之间的关系曲线, 如图 2 所示。

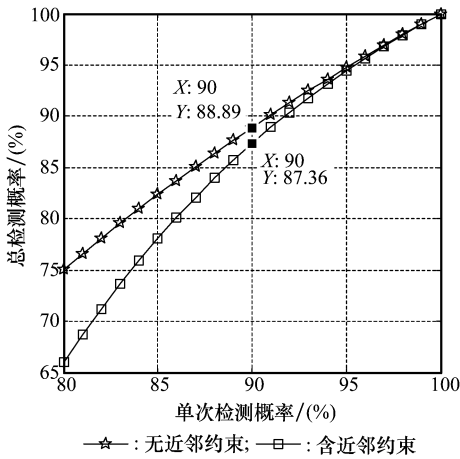


图 1 无近邻约束与含近邻约束的总检测概率比较

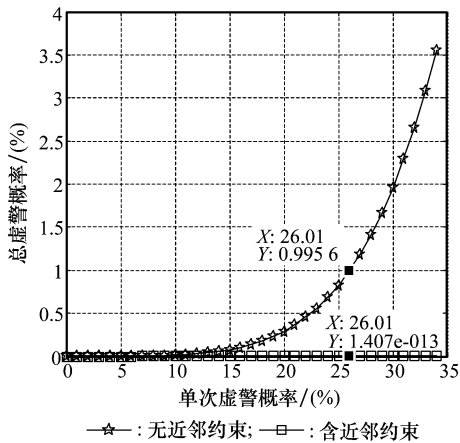


图 2 无近邻约束与含近邻约束的总虚警概率比较

由图 1 可见,含近邻约束时,当  $p_d = 80\%$  时,有  $P_D = 66.04\%$ ;无近邻约束时,当  $p_d = 80\%$  时,有  $P_D = 75.07\%$ ,即在相同的单次检测概率  $p_d$  下,总检测概率  $P_D$  有所降低;但随着  $p_d$  的增大,当  $p_d$  达到  $90\%$  以上时,含近邻约束时的  $P_D$  与无近邻约束时的  $P_D$  之间的差距小于  $2\%$ 。在对唐检测算法进行参数设计时,为了满足系统总检测概率达到  $90\%$  的要求,单次检测概率应该保证在  $90\%$  以上,所以在唐检测算法中引入近邻约束后,虽然总检测概率会有损失,但在所关注的单次检测概率取值区域内,损失可以忽略不计。

由图 2 可见,在引入近邻约束后,总虚警概率  $P_{FA}$  大大降低,如当  $p_{fa} = 10^{-4}$  时,有  $P_{FA} = 0.4 \times 10^{-24}$ ,而无近邻约束时,当  $p_{fa} = 10^{-4}$  时,有  $P_{FA} = 1 \times 10^{-16}$ ;特别是当  $p_{fa}$  较大时,引入近邻约束后,对  $P_{FA}$  的压低作用仍非常明显,如,在无近邻约束时,当  $p_{fa} = 26.01\%$  时,  $P_{FA}$  已达  $10^{-2}$  量级,而含近邻约束时,当  $p_{fa} = 26.01\%$  时,  $P_{FA}$  仍在  $10^{-15}$  量级。由此可见,在引入近邻约束后,在总检测概率变化不大的情况下,极大地降低了唐检测算法的虚警概率。

如上分析,在传统唐检测算法中引入近邻约束后,可以

极大地降低总虚警概率。因此,可以在总虚警概率满足系统要求的前提下,降低对单次虚警概率的要求,进而通过降低检测门限,达到提高检测概率的目的,增强系统在极低信噪比环境下的检测能力。

伪码连续波测量雷达接收端信号最低载噪比约为  $35 \text{ dBHz}$ ,核算至检测前信噪比约为  $5 \text{ dB}$ ,根据高斯白噪声条件下的信号检测理论,当采用平方律检波器<sup>[15-16]</sup>时,要满足检测概率  $90\%$ ,虚警概率  $10^{-8}$  的要求,所需的检测前信噪比  $r_{SN}$  为  $14.2 \text{ dB}$ ,此时检测门限  $v_i = 36.84$ 。当采用唐检测算法后,当  $P_{FA} = 10^{-8}$ ,上/下行计数器  $k$  初值  $B = 1$ ,上行门限  $A = 5$ ,  $L = 128$ ,  $l = 0$  时,在无近邻约束和含近邻约束两种情况下,总检测概率和检测前信噪比的关系如图 3 所示。

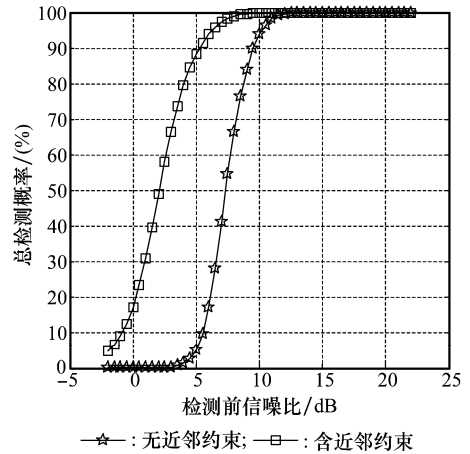


图 3 无近邻约束与含近邻约束时总检测概率与检测前信噪比的关系 ( $P_{FA} = 10^{-8}$ )

由图 3 可见,无近邻约束时,  $p_{fa} = 10^{-2}$ ,  $v_i = 9.23$ ,当  $r_{SN} = 5.3 \text{ dB}$  时,有  $P_D = 7.58\%$ ;若使  $P_D \approx 90\%$ ,则应有  $r_{SN} = 9.6 \text{ dB}$ 。而含近邻约束时,  $p_{fa} = 0.34$ ,  $v_i = 2.14$ ,当  $r_{SN} = 5.3 \text{ dB}$  时,有  $P_D \approx 90\%$ 。此时,测量雷达灵敏度附近的信号也可以可靠地检测到。由此可见,在引入近邻约束后,在总虚警概率满足要求的前提下,一方面,在检测前信噪比相同的条件下,通过降低检测门限,大幅度提高了检测概率;另一方面,在总检测概率相同的条件下,所需的检测前信噪比减小了约  $5 \text{ dB}$ ,相当于改进唐检测算法带来了约  $5 \text{ dB}$  的信噪比增益,当参数不同时,所获得的信噪比增益还可能更大,即在引入近邻约束后,唐检测算法的灵敏度得到了显著提高。

### 3.2 平均驻留次数

检测算法的检测速度是衡量算法性能的另一个重要指标。唐检测算法的检测速度由平均驻留次数来决定。在马尔可夫链中,从任意状态  $i$  出发、到达吸收态  $A$  或  $0$  停止的平均次数,定义为平均吸收时间<sup>[11]</sup>  $\mu_i (i = 0, 1, \dots, A)$ ,  $\mu_i$  是下列方程组的唯一解:

$$\begin{cases} \mu_0 = 0, \mu_A = 0 \\ \mu_i = 1 + \sum_{j=0}^A p_{ij} \mu_j, i = 1, 2, \dots, A-1 \end{cases} \quad (20)$$

利用平均吸收时间的定义,将式(3)和式(7)代入方程组式(20)即可得到在无近邻约束和含近邻约束时,唐检测算法上/下行计数器 $k$ 从初值 $B$ 开始,到达 $A$ 或 $0$ 停止的平均驻留次数。

设唐检测算法上/下行计数器 $k$ 初值 $B=1$ ,表1和表2分别给出了对目标存在单元和噪声单元利用唐检测算法进行验证时,以 $A$ 为参变量,在不同的单次检测概率和单次虚警概率下,由方程组式(20)计算得到的平均驻留次数。

表1 验证目标存在单元时的平均驻留次数

A	$p_d$ (无近邻约束)			$p_d$ (含近邻约束)		
	0.9	0.93	0.95	0.9	0.93	0.95
5	4.3	4.1	4.1	5.1	4.7	4.5
6	5.4	5.3	5.2	6.5	5.9	5.7
12	12.1	11.7	11.5	14.9	13.5	12.7

表2 验证噪声单元时的平均驻留次数

A	$p_{fa}$ (无近邻约束)			$p_{fa}$ (含近邻约束)		
	0.3	0.1	$10^{-6}$	0.3	0.1	$10^{-6}$
5	2.6	1.3	1.0	1.9	1.2	1.0
6	2.4	1.3	1.0	1.9	1.2	1.0
12	2.4	1.3	1.0	1.8	1.2	1.0

由表1可见,在相同条件下,引入近邻约束后,唐检测算法的平均驻留次数略有增加;由表2可见,引入近邻约束后唐检测算法的平均驻留次数略有减小,即可知,在引入近邻约束后,唐检测算法的检测速度几乎不受影响。

## 4 结论

在可变驻留时间唐检测算法中引入近邻约束,可在总检测概率损失不大的情况下,大幅度降低总虚警概率,则可在总虚警概率满足系统要求的前提下,通过降低检测门限,大幅度提高检测概率,改善唐检测算法的灵敏度,增强系统在极低信噪比环境下的检测能力;且在引入近邻约束后,对目标存在单元验证和对噪声单元验证时的平均驻留次数几乎不变,因而对检测速度没有影响。因此,含近邻约束的改进唐检测算法可以有效地应用于接收信号极微弱的伪码连续波测量雷达初始粗同步捕获过程中,并且由于改进唐检测算法可以带来较大的信噪比增益,因而也适用于其他需改善检测算法灵敏度的信号检测处理过程中。

## 参考文献:

[1] 位寅生,许诺,侯颖辉. 星载雷达弱目标长时间积累算法研究[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(10):1638-1642. (Wei Y S, Xu N, Hou Y H. Study on long-time integration algorithm for weak space-borne radar target[J]. *Systems Engineering and Electronics*,2007,29(10):1638-1642.)

[2] Yen N Y, Su S L. Robust matched-filter acquisition for direct-sequence ultrawide band systems[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*,2009,58(8):4419-4452.

[3] Li H, Lu M Q, Feng Z M. Improved zero-padding method for rapid long PN-code acquisition[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*,2008,56(8):3795-3799.

[4] 钱镱,崔晓伟,陆明泉,等. PN码快速捕获中的捕获策略和性能分析[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(10):1991-1994. (Qian Y, Cui X W, Lu M Q, et al. Acquisition strategy and performance analysis for fast PN code acquisition[J]. *Systems Engineering and Electronics*,2008,30(10):1991-1994.)

[5] Di Renzo M, Annoni L A, Graziosi F, et al. A novel class of algorithms for timing acquisition of differential transmitted reference UWB receivers: architecture, performance analysis and system design [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008,7(6):2368-2387.

[6] Kaplan E D, Hegarty C. *Understanding GPS: principles and application* [M]. 2nd ed. Boston: Artech House Publishers, 2006:166-170.

[7] Qaisar S U, Dempster A G. An analysis of L1-C/A cross correlation & acquisition effort in weak signal environments [C] // *Proc. of the International Global Navigation Satellite Systems Society IGNSS Symposium*,2007.

[8] 姚铮,崔晓伟,陆明泉,等. 应用于GPS接收机的序贯检测器性能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(7):1166-1169. (Yao Z, Cui X W, Lu M Q, et al. Performance analysis of sequential detector for GPS receivers[J]. *Tsinghua Science and Technology*,2007,47(7):1166-1169.)

[9] Khan U A, Kar S, Moura J M F. Distributed sensor localization in random environments using minimal number of anchor nodes [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*,2009,57(5):2000-2016.

[10] Bender A, Rainsford T. Inhomogeneous Markov approach to percolation theory based propagation in random media [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*,2008,56(10):3271-3284.

[11] Bertsekas D P, Tsitsiklis J N. 概率导论[M]. 2版. 郑忠国,童行伟,译. 北京:人民邮电出版社,2009:219-316. (Bertsekas D P, Tsitsiklis J N. *Introduction to probability* [M]. 2nd ed. Zheng Z G, Tong X W, trans. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009:219-316.)

[12] Bustamante-Cedeno E, Arora S. Allocation of transmission charges for real-power transactions using markov chains [J]. *Generation, Transmission & Distribution*,2007,1(4):655-662.

[13] Ephraim Y, Roberts W J J. An EM algorithm for Markov modulated Markov processes [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*,2009,57(2):463-470.

[14] 崔崑,朱新国,吴嗣亮. 基于约束判决的二次门限检测[J]. 电子与信息学报,2009,31(9):2074-2078. (Cui W, Zhu X G, Wu S L. Study on double threshold detection based on constraint judgement [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*,2009,31(9):2074-2078.)

[15] Sun K, Presti L L. Channels combining techniques for a novel two steps acquisition of new composite GNSS signals in presence of bit sign transitions [C] // *Proc. of the IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium PLANS*,2010:443-457.

[16] Winternitz L M B, Bamford W A, Heckler G W. A GPS receiver for high-altitude satellite navigation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*,2009,3(4):541-556.