

# UWSNs 中基于 AUV 移动的覆盖盲区修复算法

张宁申<sup>1</sup> 黄晨程<sup>1</sup> 刘林峰<sup>2</sup>

(南京邮电大学计算机学院 南京 210023)<sup>1</sup>

(江苏省无线传感网高技术研究重点实验室 南京 210003)<sup>2</sup>

**摘要** 提出了一种水下无线传感器网络(UWSNs)中基于自主水下航行器(AUV)移动的覆盖算法。首先将要覆盖的区域网格化,然后以适当的策略遍历各个小格,从而实现盲区的覆盖修复。该算法克服了水下环境复杂未知、覆盖场景多样化而难以可靠覆盖的问题,同时使得 AUV 路径移动消耗最小化。文中还对 3D 场景和多 AUVs 协同等情况进行了分析和探讨。仿真实验表明,该算法在覆盖盲区规则、不规则或不连续等场景下均有较好的表现。

**关键词** 水下无线传感器网络,自主水下航行器,覆盖盲区修复

**中图分类号** TP393 **文献标识码** J

## Coverage Blind Restoration Algorithm Based on AUV Movement in UWSNs

ZHANG Ning-shen<sup>1</sup> HUANG Chen-cheng<sup>1</sup> LIU Lin-feng<sup>2</sup>

(School of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)<sup>1</sup>

(Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210003, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper proposed a coverage blind restoration algorithm based on AUV Movement in underwater wireless sensor networks(UWSNs). Firstly, the area to be covered is mapped into many hex cells, and then in order to achieve restoration of coverage blind, the AUV traverses each cell according to a proper strategy. The algorithm overcomes the problem that the underwater environment is complex and unknown so that it is difficult to reliably cover the scene. It also helps the AUV to minimize the consumption of traversing paths. We also analyzed and discussed the situation of 3D scenes and multiple AUVs collaborations. Simulation results show that the algorithm performs well on the restoration of coverage blind, no matter the scenes are regular, irregular or discontinuous.

**Keywords** Underwater wireless sensor networks, Autonomous underwater vehicle, Restoration of coverage blind

## 1 引言

水下无线传感器网络(Underwater Wireless Sensor Networks, UWSNs)已经成为研究的热点<sup>[1,2]</sup>,作为无线传感器网络的外延形式和拓展应用,其在海洋勘探、水文监测、远洋开采等领域具有重要应用价值。UWSNs 每个节点只能探测自身周围一定范围内的兴趣数据,感知范围有限<sup>[3,4]</sup>。这些节点通常通过飞机、船舶等随机投放部署,覆盖范围具有很大的不确定性<sup>[5]</sup>,普通传感器节点难以覆盖全部区域,因此需要补充额外节点来覆盖盲区,但该方式成本较高,极可能需要补充大量的节点来覆盖小范围的盲区。

## 2 相关研究

关于无线传感器网络节点覆盖优化,目前国内外有不少研究,它们分别针对不同的场景。文献[6]提出了一种节点放置算法,使得其具有尽可能高的整体覆盖性能。文献[7]对该算法进行了改进,把区域划分成了许多正方形的网格,该算法提升了覆盖性能,但同时也增加了复杂度。文献[6,7]考虑的是对普通节点的部署,要完成对大片水域的覆盖,需要大量的

节点,并且,由于水下无线传感器网络节点部署时通常随机投放,不可能实现在指定位置部署。文献[8]采用梯度算法,引导一批 AUVs 移动至某片区,以指定密度分布。文献[9]提出了一种多 AUVs 覆盖控制算法,算法模仿动物“领土划分”的行为,让 AUVs 互相保持一定的距离,即原本距离远的适当拉近,过近则适当远离,最终达到一种稳定的状态,达到覆盖控制优化的目的。文献[8,9]主要考虑的是如何引导场景中的大量 AUVs 有序移动。相比普通节点,AUV 的成本要高得多,因此,我们采用先随机投放大量普通节点,再以 AUV 修复覆盖盲区的方式来平衡成本与覆盖率。

与本研究最相关的一种典型算法是割草机算法<sup>[10]</sup>:如图 1 所示,灰色区域为待覆盖区域,理想情况下,AUV 可通过紧凑的 S 形移动完成覆盖任务。但这个算法并不适用于本文所要解决的问题,原因如下:

(1)普通节点部署随机,未覆盖区域的形状、面积各异,难以针对特定场景制定全局解决方案。

(2)水下环境复杂,具有极强的不确定性。AUV 无法预先获知某区域是否需要或适宜探索。

(3)割草机算法中当 AUV 临近区域边界时需要逆向转

本文受国家自然科学基金(61373139),江苏省自然科学基金(BK2012833),江苏省高校自然科学研究计划(12KJB520011),江苏省普通高校研究生科研创新计划资助。

张宁申(1989-),男,硕士生,主要研究方向为水声传感器网络,E-mail:ningshen\_zhang@163.com;黄晨程(1990-),女,硕士生,主要研究方向为水声传感器网络;刘林峰(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为水声传感器网络和机会网络。

角,根据 AUV 的移动特点这需要付出大量额外能量才能完成。

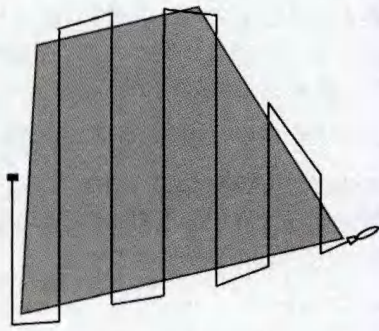


图1 割草机算法遍历示意

### 3 本文算法

#### 3.1 问题建模

当前考虑 2D 场景下 AUV 如何覆盖盲区(形状不确定,亦可能由若干不连续的小块组成)。假定 AUV 的有效探测范围是以其自身为圆心、半径固定的圆形。AUV 在移动过程中连续地采集附近的兴趣数据。我们希望 AUV 以尽可能小的路径代价完成覆盖任务,即移动距离尽可能短。本文不考虑定位问题,假定节点携带 GPS 并能够准确实时获知自身坐标。

AUV 能耗计算公式如下:

$$E_c = k_1 L + k_2 r \sum \left( \frac{\text{Max}(\theta - \theta_0, 0)}{\pi} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中,  $L$  为 AUV 移动路径长度,  $r$  为 AUV 感知半径,  $\theta$  为 AUV 每次转向的转角大小,  $\theta_0$  为每次转向的免费额度(即忽略小角度转角所消耗的能量),  $k_1$ 、 $k_2$  和  $\alpha$  为系数。

#### 3.2 算法描述

针对上述问题及模型,我们提出了下面的 CBRA-AM (Coverage Blind Restoration Algorithm based on AUV Movement) 算法。如图 2 所示,首先将待探索的盲区水域网格化为若干个正六边形的小格。在 2D 平面上,正六边形是可紧凑拼接的最多边数的正多边形。边数更多意味着每个小格具有更多的邻居小格,这对本算法有利。如图 3 所示,设定每个正六边形的边长等于 AUV 的覆盖半径(此时,每个小格的大小刚好等于 AUV 覆盖圆的内接正六边形),这样,当 AUV 移至某个正六边形小格的中心时,即可完成对该小格的覆盖。当 AUV 遍历所有的小格质心时,即可完成对盲区的覆盖。为了最小化 AUV 的路径消耗,本文设计了一种算法来尝试求得该问题的近似解。

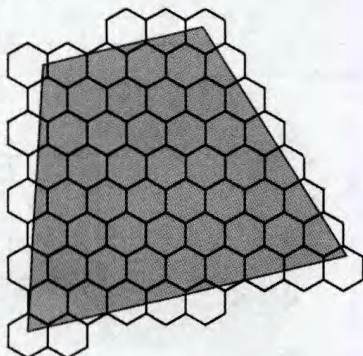


图2 盲区网格化划分

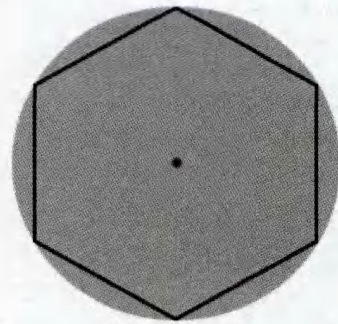


图3 AUV 覆盖范围内接正六边形

受到上文提到的割草机算法的启发,所设计的算法的整体思路为:AUV 尽可能贴着已经覆盖的区域(或不需要覆盖的区域)进行移动,这样有利于缩短移动路径、提高覆盖效率和减少能量消耗。假定 AUV 当前位于某个小格,其遵循如下规则来决定下一步的移动位置,具体算法如下:

Step 1 AUV 检查自身所在小格周围 6 个邻居格的状态,选取未覆盖过的小格作为候选格。

Step 2 检查每个候选格周围 6 个邻居格的状态,将拥有最少未覆盖邻居的候选格作为下一步的目的地。如果出现多个候选格计算结果相等,则选取使得 AUV 转弯角度较小的解。

Step 3 重复 Step 1、Step 2,直至盲区被覆盖。

在 Step 1 中,如果 AUV 周围不存在未覆盖过的邻居小格,则沿直线前往最近的未覆盖格,直至完成对整片水域的覆盖。



图4 盲区覆盖示例

如图 4 所示,图中灰色区域为已覆盖区域,白色区域为未覆盖区域。当前 AUV 位于 A 处,小格 B、C、D、E、F 和 G 为其 6 个邻居格,其中, B、G、F 未覆盖,首先将这 3 个小格作为候选格,然后分别检查它们周边未覆盖邻居格的数量: G 有 5 个未覆盖的邻居,而 B、F 各有 3 个未覆盖的邻居,因此接下来的移动位置将在 B 和 F 中产生。此时取决于 AUV 当前状态,假定它之前从 C 移至 A,那么遵循转弯角度更小的规则,将选取 F 作为接下来的移动位置。算法伪代码如下:

```

start
List uncoveredNeighbors ← Empty
foreach neighbor in neighbors
    if IsUncovered(neighbor) then
        uncoveredNeighbors. Add(neighbor)
    end if
end foreach
if uncoveredNeighbors.Count > 0 then
    List n1 ← FindPositionsWithMostNeighborsIn(uncoveredNeighbors)

```

```

Position result ← LeastAngleIn(nl)
return result
else
    Position result ← NearestUncoverdPosition
    return result
end if
end

```

## 4 算法分析

### 4.1 复杂度

CBRA-AM 算法的空间复杂度为  $O(n)$ ,  $n$  为区域划分出的小格总数。每一次选取接下来的移动方向, 当周围存在未覆盖的邻居小格时, 算法时间复杂度为  $O(1)$ ; 当周围不存在未覆盖的邻居小格时, 寻找下一步移动方向的算法时间复杂度为  $O(n)$ ,  $n$  为区域划分的小格总数。我们的仿真实验表明, AUV 遵照本算法移动, 很少遇到周围没有未覆盖的邻居的情况, 除非场景中包含大量不连续的未覆盖区域。算法计算贯穿 AUV 移动全程, AUV 可根据当前局部信息决定下一步的移动方向, 而无需计算出完整的移动路径。

### 4.2 覆盖率

遵照 CBRA-AM 算法, AUV 会一直寻找未覆盖的区域, 直至整片水域被完全覆盖后才终止, 且算法稳定收敛。因此, 当网格大小设为 AUV 覆盖圆的内接正六边形时, 理论上本算法可以保证 100% 覆盖。若增大初始化网格的大小, 可缩短 AUV 移动路径长度, 但覆盖率将下降。设 AUV 覆盖半径为  $r$ , 当初始化网格六边形边长增大至  $\frac{4}{3}r$  时, 如图 5 所示, AUV 相邻两段平行路径将刚好贴合(两条路径之间刚好不存在覆盖盲区, 同时也没有重叠覆盖的区域), 此时, 覆盖盲区仅发生在 AUV 移动路径转折处, 整体覆盖率仍接近 100%。若继续增大小格尺寸, 覆盖盲区将大量出现, 覆盖率明显下滑。设 AUV 覆盖半径为  $r$ , 初始化六边形边长为  $a(a > \frac{4}{3}r)$ , 此时相邻的平行路径间的距离为  $1.5a$ , 这两段路径之间将出现宽度为  $1.5a - 2r$  的狭长覆盖盲区, 整体覆盖率将不足

$$\frac{2r}{1.5a} = \frac{4r}{3a} \quad (2)$$

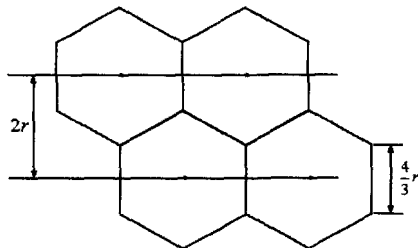


图 5 两段平行路径

### 4.3 路径长度

设正六边形小格内接圆的半径为  $a$ , 易求得该小格面积为  $2\sqrt{3}a^2$ 。设要覆盖的区域的面积为  $S$ , 则区域至少包含  $\frac{S}{2\sqrt{3}a^2}$  个小格。AUV 每次从一个小格移动至相邻的下一小格, 移动距离为  $2a$ 。因此, 遍历所有这些小格总的路径长度为:

$$2a \cdot \frac{S}{2\sqrt{3}a^2} = \frac{S}{\sqrt{3}a} \quad (3)$$

由于待覆盖的区域不可能恰好由若干小格组成, 为了保证完全覆盖, 在待覆盖区域的边缘, 小格会超出实际的待覆盖区域。在待覆盖区域边缘轮廓相对平滑的情况下, 设待覆盖区域边缘周长为  $C$ , AUV 绕区域边缘一周, 需要付出长度为  $C$  的移动距离。处在区域边缘的小格平均将有一半面积位于待覆盖区域外。因此, AUV 的移动路径长度需额外加上  $\frac{C}{2}$ 。

当存在多片不连续的待覆盖区域时, AUV 为奔走于这些区域之间, 还需额外付出距离  $D$ 。  $D$  为依次连接多片区域的最小总连线长度。综上, 算法的期望路径长度为

$$L = \frac{S}{\sqrt{3}a} + \frac{C}{2} + D \quad (4)$$

此时, 即使是一片连续区域, AUV 也可能无法总是顺利地未覆盖的邻居小格移动直至遍历所有小格, 而是需要向附近非邻居小格移动。这时, AUV 将付出额外的移动代价。因此实际路径长度将略大于上面的期望路径长度。

### 4.4 三维场景及多 AUVs 协同情况

当要覆盖的区域为 3D 场景时, 可以对 CBRA-AM 算法做如下少量修改: 初始化时, 将整个场景划分为若干个正十二面体, 这样每个小格具有 12 个邻居格, 算法其余部分不变。每个小格拥有的邻居小格越多, AUV 每次的可选移动方向就越多, AUV 越容易被引导到合理的位置。当有多个 AUVs 协同完成对某个场景的覆盖任务, 仍可采用 CBRA-AM 算法。本算法要求 AUVs 之间能够即时通信, 以及将自己覆盖过的区域告知其它 AUVs。由于有多个 AUVs, AUV 在移动过程中更容易陷入周围不存在未覆盖的邻居小格的情况。因此, 所有 AUVs 的累计移动路径略高于单 AUV 的情况, 累计能量消耗也略有增加。采用本算法, 多 AUVs 场景仍可很好地适用于不规则的覆盖区域, 总体覆盖率仍与网格大小有关, 同单 AUV 时的表现。

## 5 仿真实验

算法仿真采用 C# 语言程序, 图像部分以 paint.net 软件插件的方式实现。仿真实验包括: 单 AUV 情况下, AUV 从不同起点出发的情况, 初始化时采用不同网格大小对覆盖率以及路径长度的影响, 要覆盖的区域为不同形状(连续或不连续)的情况, 以及多 AUVs 情况下的算法表现。仿真实验的主要参数值如表 1 所列。图 7—图 9 实验设定的待覆盖区域为如图 6 所示的铜钱形区域。

表 1 主要参数值

参数	$k_1$	$k_2$	$\alpha$	$r$	$\theta_0$
值	0.7	1.5	1	15	$\pi/3$

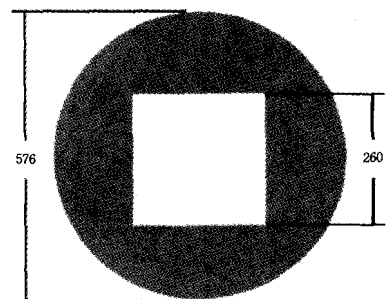


图 6 铜钱形待覆盖区域

设初始化网格六边形边长  $a = 20$ , 图 7 展示了 AUV 从不同位置出发的情况下的路径长度和能量消耗, 以及与割草机算法的比较。我们看到, 从随机选出的 5 个不同位置出发, AUV 最终的路径长度和能量消耗几乎一致, 这表明 CBRA-AM 算法具有稳定的表现。事实上, 依照本算法规则, AUV 从某个小格移向相邻小格的移动距离总是恒定的, 最终路径长度的差异仅产生在 AUV 周围的邻居小格均已被覆盖的时候, 因此算法表现稳定。5 次试验 CBRA-AM 算法在路径长度、能量消耗上的表现均优于割草机算法。

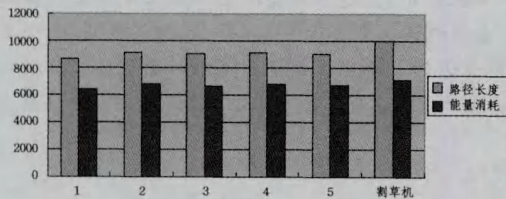


图 7 CBRA-AM 算法与割草机算法的比较

在不同的初始化网格大小的情况下, 覆盖率的变化如图 8 所示。我们看到, 当网格六边形边长小于等于 AUV 的感知半径 15 时, 算法能够保证 100% 的覆盖率。当六边形边长增大至 20 时, 覆盖率仍高达 96.9%。边长为 20 意味着刚好满足  $a = \frac{4}{3}r$ , 这时相邻的两段平行路径恰好贴合, 之间不存在覆盖盲区, 覆盖盲区仅发生在 AUV 移动路径转折处, 因此整体覆盖率仍很高, 如图 9 所示。一旦网格六边形边长超过 20 这个临界值, 覆盖率将迅速下滑, 因为此时相邻的平行路径之间也开始出现覆盖盲区。

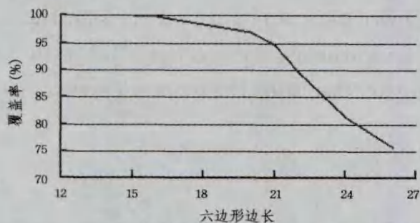


图 8 初始化网格大小对覆盖率的影响

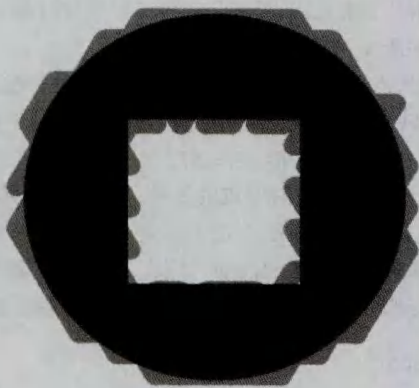


图 9  $a=20$  时 CBRA-AM 算法的覆盖情况

图 10 显示了初始化网格大小对 AUV 能量消耗的影响。我们看到, 随着初始化网格的增大, AUV 能量消耗呈现下降趋势。这是因为, 根据式(4), 路径长度与网格大小负相关, 更大的网格意味着更短的路径长度, 同时, 更大的网格使得

AUV 的转向次数大幅减少, 因此 AUV 能量消耗减少在情理之中。

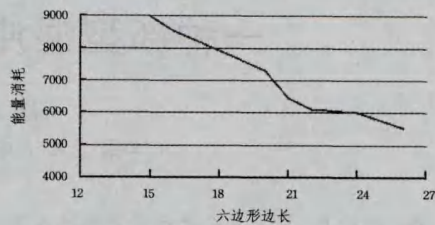


图 10 初始化网格大小对能量消耗的影响

图 11 反映了在待覆盖区域不规则的情况下 CBRA-AM 算法的表现。实验方法如下: 在一个  $100 \times 100$  的区域中随机生成 3 个边长为 10 的正方形, 定义待覆盖区域离散度  $P$  为 3 个正方形的中心到这 3 个正方形整体质心的平均距离。然后以这 3 个正方形的并集作为待覆盖区域, 统一将此区域放大至面积等于 100000。从图 11 可以看到, 总体上, 待覆盖区域离散度越高, 即区域越不规则, AUV 能量消耗越大。由于  $P$  值仅能大致反映出区域的不规则程度, 因此图中折线存在一些波动。该实验产生的待覆盖区域形状复杂、随机性高, 割草机算法已经无法适用。

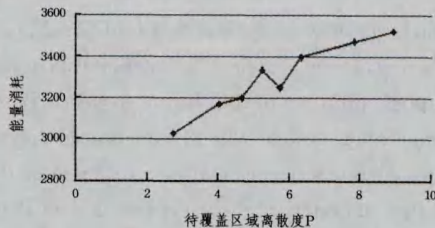


图 11 覆盖区不规则情况下 CBRA-AM 算法的表现

**结束语** 为了完成对场景复杂多样的未知盲区的覆盖任务, 本文提出一种 UWSNs 中基于 AUV 移动的覆盖盲区修复算法。该算法首先对场景网格化划分, 然后引导 AUV 以合适的移动路径完成对场景的覆盖。文中描述了单 AUV 在 2D 场景下的工作情况, 并讨论了 3D 场景以及多 AUVs 协同的情况。仿真实验表明, 该算法在多种复杂场景下均表现出良好的性能。

## 参考文献

- [1] Davis A, Chang H. Underwater wireless sensor networks[C]// Oceans, 2012. 2012; 1-5
- [2] Amis A D, Prakash R, Vuong T H P, et al. MaxMin d-cluster formation in wireless ad hoc networks[C]// Proc of the IEEE Nineteenth Annual Joint Conference on Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000). Tel Aviv, Israel, Piscataway: IEEE Press, 2000; 32-41
- [3] Manjula R B, Manvi S S. Coverage optimization based sensor deployment by using PSO for anti-submarine detection in UWASNs[C]// Ocean Electronics (SYMPOL), 2013. 2013; 15-22
- [4] 王静, 陈建峰, 等. 水下无线传感器网络[J]. 声学技术, 2009, 28(1): 89-95

(下转第 161 页)

## 2.4 扩频隐蔽通信系统误码率分析

卫星隐蔽通信系统的性能以隐蔽性能和抗干扰性能来衡量。隐蔽性能以原卫星业务系统在扩频调制信号干扰下接收端误码率的变化为衡量指标;抗干扰性能以隐蔽通信接收端的误码率作为衡量指标。

为了验证基于混沌移位键控的卫星隐蔽通信系统的性能,对系统的隐蔽性能和抗干扰性能进行仿真。

图9所示为原业务信号功率与扩频调制信号功率比分别为0dB, 5dB, 10dB和20dB时原业务接收机误码率随信噪比的变化曲线,以及原业务信号在无扩频调制信号干扰下误码率的理论值和实际值曲线。由图中可以看出,当原业务信号功率与扩频调制信号功率比值较大时,原业务接收机解调后的误码率与没有扩频调制信号影响时基本一致,根据实际情况尽量减小隐蔽信号功率,就可以满足隐蔽性。

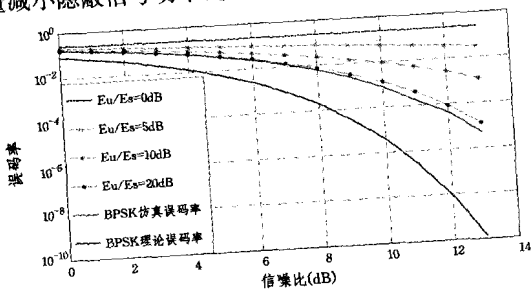


图9 原业务接收机误码率

图10所示为隐蔽信号接收机在扩频因子分别为20, 50, 80, 100时,误码率随信噪比的变化曲线,其中原业务信号功率与扩频调制信号功率比值为20dB。由图可见,虽然扩频调制信号功率较小,但当扩频因子足够大时,仍然可以正确解调出隐蔽信号,扩频因子为80、信道信噪比大于6dB时,隐蔽接收机误码率小于 $10^{-3}$ ,系统可以满足一定的抗干扰要求。也可以看出,扩频因子达到一定值时,再增加扩频因子对误码率的影响并不明显,在实际应用中应根据情况选择合适的扩频因子。

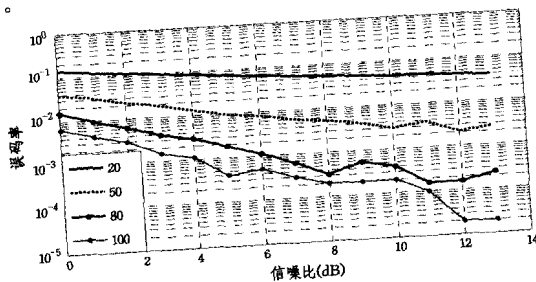


图10 隐蔽接收机误码率

**结束语** Logistic及改进型Logistic混沌映射只存在唯一满映射点,致使混沌映射生成序列遍历性差和平衡性低。针对上述缺陷,设计了一种新型混沌映射函数,拓宽了满映射参数的取值范围,进而提高了混沌序列遍历性。基于相干混沌移位键控技术,采用新型混沌映射构建了混沌扩频卫星隐蔽通信系统,增加了可用地址码的数量,改善了伪随机码扩频的卫星隐蔽信号易被截获的情况,有助于提高通信的保密性。

分别对新型混沌序列的随机性、相关性和平衡性,以及隐蔽通信系统的误码率进行了仿真分析,结果表明:新型混沌映射比已有映射遍历性更好,平衡性更高。原业务信号与扩频调制信号功率比值为20dB时,原业务接收机接收误码率基本不受影响。扩频因子为80、信道信噪比大于6dB时,隐蔽接收机误码率小于 $10^{-3}$ ,能满足一定的隐蔽通信要求,从而证明了该算法的有效性。

## 参考文献

- [1] 郑世慧,张国艳,杨义先,等. 基于混沌的带密钥散列函数安全分析[J]. 通信学报, 2011, 32(5): 146-152
- [2] 周庆,胡月,廖晓峰. 一种基于TD-ERCS的性特征密钥产生算法[J]. 物理学报, 2009, 58(7)
- [3] 李家标,曾以成,陈仕必,等. 改进型Henon映射生成混沌伪随机序列及性能分析[J]. 物理学报, 2011, 60(6)
- [4] 邱劲,王平,肖迪. 基于混沌映射的伪随机序列发生器[J]. 计算机科学, 2011, 38(10): 81-83
- [5] Mazzini G, Setti G, Rovatti R. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA Part2: Some theoretical performance bounds [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems Part1, 1998, 45(4): 496-506
- [6] 杨吉云,廖晓峰,肖迪,等. 对一种基于Logistic映射的分组加密机制的分析和改进[J]. 通信学报, 2008, 29(12): 86-90
- [7] Gu Jun-rong, Wang J H, Han Ning, et al. Analysis of an interleaved chaotic spread spectrum sequence [C] // International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2008
- [8] 易称福. 混沌扩频序列设计及其在扩频通信中的应用研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2007
- [9] 廖旋焕,高金峰. 广义映射混沌扩频序列及其特性分析[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(7): 1255-1257
- [10] 王亥,胡健栋. 改进型Logistic-Map混沌扩频序列[J]. 通信学报, 1997, 8(8): 71-77
- [11] 柳平,闫川,黄显高. 改进的基于Logistic映射混沌扩频序列的产生方法[J]. 通信学报, 2007, 28(2): 134-140
- [12] 任义龙,刘渊. 一种基于Holder指数的DDoS攻击检测方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 724-727

(上接第157页)

- [5] Stefanov A, Stojanovic M. Design and Performance Analysis of Underwater Acoustic Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(10)
- [6] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks [J]. Wireless Communications and Networking, IEEE, 2003, 3(3): 1609-1614
- [7] 蔺智挺,屈玉贵,翟羽佳,等. 一种高效覆盖的节点放置算法[J].

- [8] Cortes J, et al. Coverage control for mobile sensing networks [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243-255
- [9] 吴小平,冯正平. 多AUV覆盖控制研究[J]. 中国造船, 2009, 50(2)
- [10] Nguyen B, Hopkin D, Yip H. Autonomous underwater vehicles a transformation of mine counter-measure operations [J]. Def. Secur. Anal., 2008, 24(3): 247-266