

基于变邻域粒子群的短波频率选择算法

杨博, 王叶群, 黄国策, 刘剑, 王桂胜

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 为了快速寻找短波频段内的目标频点, 结合宽带频谱感知技术, 提出了基于变邻域粒子群搜索(VNS-PSO)的短波双向探测频率选择算法。现有的探测频率选择算法依据频点的平均信噪比进行评估选优, 未考虑短波信道的小尺度随机衰落特性, 难以满足实时选频的要求。文中VNS-PSO算法依据大尺度衰落的相关特性, 采用最大分离法得到初始探测频点集, 以此来划分相关邻域; 针对邻域内频点质量选择性衰落特点, 采用粒子群优化算法搜索邻域内频点, 得到邻域内最优解; 通过变换邻域, 得到全局最优解。仿真实验表明: “最快速度”建链时, VNS-PSO算法较VNS-RS、AASS、RSS算法MTOBC分别降低17.1%、18%、85.5%, 当CPOS=0.9, 建链时间分别降低2.5%、42.6%、81.7%, 缩短了建立可通链路的时间; “最优频点”建链时, VNS-PSO算法较VNS-RS、AASS、RSS算法MTOBC分别降低11%、12.5%、45%, 当CPOS=0.9, 建链时间分别降低22.2%、22.4%、44.4%, 短时间可找到最优频点。

关键词 频率选择; 短波通信; 变邻域搜索; 粒子群优化

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2022.02.009

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)02-0054-06

A HF Frequency Selection Algorithm Based on Variable Neighborhood Particle Swarm Optimization

YANG Bo, WANG Yequn, HUANG Guoce, LIU Jian, WANG Guisheng

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract In order to quickly find an optimal frequency point in the HF frequency band, a HF bidirectional detection frequency selection algorithm based on the variable Neighborhood particle swarm search (VNS-PSO) is proposed in combination with the broadband spectrum sensing technology. The existing detection frequency selection algorithms are difficult to meet the needs of real-time frequency selection because they are mainly based on the average signal-to-noise ratio of the frequency points to evaluate and select the best, and the small-scale random fading characteristics of the short-wave channel is left out of consideration. According to the correlation characteristics of large-scale fading, the initial detection frequency set is obtained by the maximum separation method to divide the correlation neighborhood. According to the characteristics of mass selective fading of neighborhood internal frequency points, particle swarm optimization algorithm is used to search neighborhood internal frequency points and to obtain the local optimal solution. The global optimal solution is obtained by transforming the neighborhood. The simulation experiment

收稿日期: 2020-11-02

基金项目: 陕西省自然科学基金(2020JM-344); 航空科学基金(201901096001)

作者简介: 杨博(1995—), 男, 河南三门峡人, 硕士生, 研究方向: 短波通信。E-mail: 493217445@qq.com

引用格式: 杨博, 王叶群, 黄国策, 等. 基于变邻域粒子群的短波频率选择算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(2): 54-59.
YANG Bo, WANG Yequn, HUANG Guoce, et al. A HF Frequency Selection Algorithm Based on Variable Neighborhood Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(2): 54-59.

shows that when “The fastest speed” is used to build the chain, compared with VNS-RS, AASS and RSS, MTOBC of the VNS-PSO algorithm reduces by 17.1%, 18% and 85.5% respectively. When the CPOS=0.9, the chain building time decreases by 2.5%, 42.6% and 81.7% respectively, the time for establishing a passable link is shortened. When “optimal frequency point” is used to build the chain, the MTOBC of VNS-PSO algorithm reduces by 11%, 12.5%, and 45% respectively, compared with VNS-RS, AASS, and RSS algorithms. When the CPOS=0.9, the chain building time reduces by 22.2%, 22.4%, and 44.4% respectively, and the optimal frequency point can be found in a short time.

Key words frequency selection; HF communication; variable neighborhood search; particle swarm optimization

短波通信主要用于中远距离通信,依靠电离层反射(天波)来传播,一直是军事通信的重要手段。然而,短波通信^[1]受太阳活动、季节、大气活动和地球磁场等因素影响,通信频率呈现出选择性衰落特征,严重影响通信效果。短波信道衰落明显,其主要原因包括^[2]:极化、聚焦、去聚焦引起的振幅效应和多径效应。

自适应建链是短波频率选择的关键技术,能够自动选择可通频点,经历了异步建链(asynchronous automatic link establishment)^[3]、同步建链(synchronous automatic link establishment)^[4]、凝视建链(staring automatic link establishment)^[5]的发展过程。异步、同步建链方式主要采用经验选频^[6]、预测选频^[7]两种选频方式,通过预置可用频点集,从中选择频点进行 ALE 信道质量估计^[8]进行可用频点选择,由于频点集频点数量有限,专用探测选频^[9-10]设备和通信电台相分离,因此,选用的频点质量不高,降低了短波通信质量。凝视建链运用宽带接收技术,具备了短波信号全频段接收的能力,发射机在任意频点发起建链请求,宽带接收机都能够检测并识别建链信号,无需收发双方使用相同的预置频点集,将实时探测技术集成到自动建链的过程中,因此,可以通过优化发射端探测选频算法,缩短选频时间,提高选频质量,改善短波通信质量。

文献[5]采用全频谱感知技术,仿真了凝视模式下建链时间,使用预置频点集,采用随机顺序搜索(random sequential search, RSS)算法,即在频点集内随机选取一个频点,从该频点开始顺序搜索整个频点集,直到找到满足要求的频点。其中,30 s 建立链概率在 95% 以上,相比异步、同步建链方式,凝视建链速度更快。文献[10]通过对短波相邻信道相关性分析,采用先粗搜索后细搜索(approximate and subtle search, AASS)算法将整个频段不断细分,开始采用比较大的间隔顺序搜索,对搜索结果进行二阶差分运算,然后缩小间隔,依次顺序搜索整个频段,直到找到合适的频点停止搜索。该算法能够

有效的改善选频效率,但在随机衰落较为严重的情况下,差分值较高,导致探测次数急剧增加。

粒子群优化^[11](particle swarm optimization, PSO)算法是一种极小化方法,用于处理在 n 维空间中只有一个点或一个曲面才能得到最佳答案的问题。变邻域搜索算法^[12](variable neighborhood search, VNS)是一种基于邻域系统变化的启发式搜索算法。文献[13]针对多对多枢纽位置路由问题,利用 VNS-PSO 算法,将 PSO 算法嵌入在 VNS 算法中,当 PSO 算法没有为评价函数提供更好的答案时,就进入 VNS 算法,选择其中一个 VNS 邻域,在合理的计算时间内生成接近最优解。

本文将 VSN-PSO 算法应用到短波频点选择领域,对比了链路仿真场景下各个算法的建链时间和建链频点质量。首先,分析短波信道特性,得到短波信道下频点衰落特征。然后,详细介绍了 VNS-PSO 算法在短波频点搜索中的应用。最后,仿真了变邻域搜索算法在“最快速度”建链和“最优频点”建链 2 种情况下的性能参数。

1 短波信道衰落模型

短波信道在频率上表现为选择性,也称为频率色散。设短波信道的时变冲击响应为 $h(\tau, t)$, 则输出为:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t-\tau)h(\tau, t)d\tau \quad (1)$$

假设 $h(\tau, t)$ 是广义平稳的,则其信道散射函数为:

$$S(\tau, f_D) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau, \Delta t)e^{-j2\pi f_D \Delta t} d\Delta t \quad (2)$$

信道散射函数常用来刻画短波信道的二维特征。

ITS 模型^[14]是一种适用于宽带和窄带 2 种情况的短波信道模型,其冲击响应为:

$$h(t, \tau) = \sum_n h_n(t, \tau) =$$

$$\sum_n \sqrt{P_n(\tau)} D_n(t, \tau) \psi_n(t, \tau) \quad (3)$$

式中: $P_n(\tau)$ 表示功率延时分布函数, 服从 Gamma 分布; $D_n(t, \tau)$ 表示相位函数; $\psi_n(t, \tau)$ 表示随机调制函数。

可以看出, Δt 趋近于 0 时, $S(\tau, f_D)$ 就是式(3)中的 $P_n(\tau)$, 即没有多径衰落时接收端所接收到大尺度衰落后的信号强度, 主要受 τ 所影响。然而, 当 Δt 不等于 0 时, 也就是同一时刻接收器收到多个信号, 信号叠加使得接收信号强度出现多径瑞利衰落, 小尺度下呈现出频率选择性衰落的特征。

2 基于变邻域粒子群搜索的短波频点选择

在短波凝视建链模式下, VNS-PSO 算法将整个短波频段作为搜索对象, 利用双向探测信息, 智能的选择下一探测频点, 从中搜索到可用频点。相比之下, RSS 算法未利用探测信息对下一探测频点进行修正, AASS 算法虽然利用了探测的差分信息, 但需在整个频段探测一遍完成后进行修正, VNS-PSO 算法实现了逐步探测修正, 提高了建链效率。

VNS-PSO 算法的基本步骤:

Step1 初始化最大分离法划分邻域结构集, 确定邻域变换顺序和停止规则, 设置 $k=1, f_{\max}=0$, 以及最大邻域数量 k_{\max} 。

Step2 粒子群搜索 在第 k 个邻域内采用粒子群算法搜索局部最优解 f^l 。

Step3 更新 如果 $f^l > f_{\max}$, 表示第 k 个局部最优解优于当前全局最优解, 设置 $f_{\max} = f^l; k = k + 1$ 。

Step4 重复 Step2、Step3, 直到 $k > k_{\max}$ 或满足停止规则。

全频段接收器支持使用任何暂时未使用的频谱(空白空间)而不是分配的频谱, 为频谱的灵活动态使用提供了基础。MIL-STD-188-110D 给出了一种 4G-ALE 的建链探测波形标准, 其中, Fast WALE PDU 时间为 360 ms, Deep WALE PDU 持续时间为 1.32 s^[15], 本文以 Fast WALE PDU 作为建链波形进行建链时间的模拟仿真。

2.1 邻域划分

短波通信受到昼夜、季节、收发两站等多因素的影响, 整个频段内频点质量差异巨大, 然而, 根据电离层反射原理, 在相互临近的频点间接收信号的信号强度、最大多径时延、接收端信噪比等性能指标存在相关性。

为了使得划分邻域间相关性最小, 邻域内相关性最大, 邻域探测划分顺序按照最大分离算法^[16]来产生。邻域数目依据相关性进行划分, 以接收信噪比(signal to noise ratio, SNR)作为评价因素, 以相邻频点间的相似度作为停止条件, 完成邻域划分。

最大分离算法将频点分为探测集和候选集合, 探测集为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 候选集合为 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_k\}$, 最大分离算法每次从候选集内选取探测频率 f_p 。

$$\min_{i=1}^n \text{dist}(f_p, f_n) \geq \min_{i=1}^n \text{dist}(h_j, f_n) \quad (4)$$

式中: $\text{dist}()$ 表示频点之间的欧式距离, $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ 。

当探测相似度达到 0.5 时, 即 $\text{SNR}_{f_i} / \text{SNR}_{f_{i+1}} \geq 0.5$ 时, 探测结束后。将探测集中频点作为不同邻域的边界, 从而划分出不同邻域。

对于不同邻域的搜索顺序, 通过对信噪比进行排序, 邻域结构通过自减的方式, 依次进行邻域间的搜索。

2.2 停止规则

局部邻域探测的停止准则应该满足以下方面:

1) 当迭代次数达到一定限度时, 过多的时间开销难以改进通信的效果, 应该停止探测。

2) 当最优解的重复数达到一定数量时, 表明在邻域内已经找到局部最优解, 应该停止探测。

遍历所有的邻域结构时, 会出现 3 种独立的探测状况, 达到相应条件应停止探测。

1) 探测次数超过一定限度, 表明当前时段可能没有可用频率进行通信, 随机停止一定时间重新进行探测;

2) 快速建链时, 探测频点质量达到短波通信最低建链要求时, 一般为 11 dB^[17] 就能实现链路建立, 停止探测。

3) 最优频点建链时, 短波通信设备在 3 dB 的信噪比范围内传输速率相同^[15], 因而当探测频点质量达到当前最优频点 3 dB 范围内, 可认定为有效最优频点, 作为当前可用传输速率最高的频点, 可以停止探测。

2.3 邻域内粒子群优化搜索

在依据相关性划分好的邻域集后, 邻域内搜索次数的应该随着探测的电离层状态不同动态调整。

通过计算整体信噪比 $\overline{\text{SNR}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{SNR}_{f_i}$, 当 $\overline{\text{SNR}}$ 低于目标信噪比 $\frac{1}{2}$ 时, 即整体信噪比较低的情况下, 增加邻域内局部搜索, 确保邻域搜索的完备

性;当 \overline{SNR} 高于目标信噪比 $\frac{1}{2}$ 时,即整体信噪比较高情况下,可以适当减少邻域内局部搜索,提高邻域变换的速率,目标信噪比取值一般为 11 dB。

针对同一邻域内的频点的搜索,采用粒子群优化(PSO),该算法具有迭代速度快、局部最优解好的特点,可以降低探测频点的个数,提高建链速率。将优化问题表示为:

$$\begin{aligned} \max f(X), X &= [x_1, x_2, \dots, x_m]; \\ \text{s. t. } x_i &\in [a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $f(X)$ 为接收端接收信号信噪比, $[a_i, b_i]$ 为邻域的范围。

设频点粒子群由 m 个粒子组成,粒子个数依据电离层状态进行调整。 X_i 表示目标函数 $f(X)$ 的一个候选频点。

频点粒子的速度和位置的更新公式如下:

$$\begin{cases} V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c_1 \text{rand}() (P_i - X_i(t)) + \\ c_2 \text{rand}() (P_g - X_i(t)), \\ X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为第 i 个频点粒子在频点空间上的位置, $V_i = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 为第 i 个频点粒子的速度, $P_i = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 为第 i 个频点粒子从初始到当前搜索的最优位置, P_g 为搜索到的频点空间的最优位置。 c_1 和 c_2 为加速因子; $\text{rand}()$ 为随机数, x 为惯性权重系数,使得频点粒子能够保持一定速度。

3 实验仿真

3.1 目标频点状态仿真

本文采用 Voacap 软件,该软件集成了 ITS 模型,能够有效仿真短波频点衰落状况。实验仿真了拉萨-成都 2019 年 10 月 30 日 6:00 时刻的短波链路接收端信噪比的分布状况,部分仿真参数见表 1。

表 1 部分仿真参数

| | |
|------------------------------|------------------|
| SSN | 100 |
| Minimum Angle/(°) | 0.100 |
| Lhasa | 29.97 N 91.11 E |
| Chengdu | 30.10 N 103.50 E |
| Distance/km | 1 192.0 |
| TRAz | 57.4° |
| Power/kW | 1.000 |
| Noise/dBW | -145.0 |
| REQ. REL/% | 90 |
| Multipath power tolerance/dB | 3.0 |
| Multipath delay tolerance/ms | 0.100 |

首先,通过仿真拉萨-成都链路 1 h 的平均信噪比,得到接收信噪比分布状态见图 1。同时,测定了成都地区的底噪状况,如图 2 所示,利用实测数据对仿真中的默认底噪数据参数进行修正。由于短波频点是选择性衰落的,加入瑞利衰落来仿真小尺度衰落状况,同时以 3 kHz 短波窄带信道划分频点,不同频点接收信噪比如图 3 所示,可以看出其频点一段时间平均变化较为平缓,但是某一时刻相邻频点衰落状况不同,衰落情况符合式(2)短波信道衰落模型的特点。

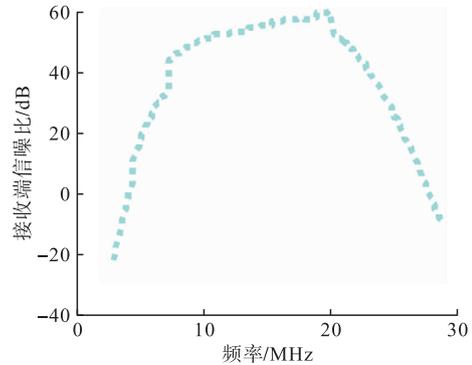


图 1 某一时刻短波频段接收信噪比分布图

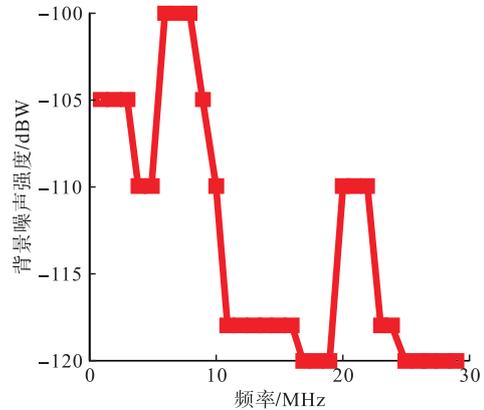


图 2 成都地区底噪情况

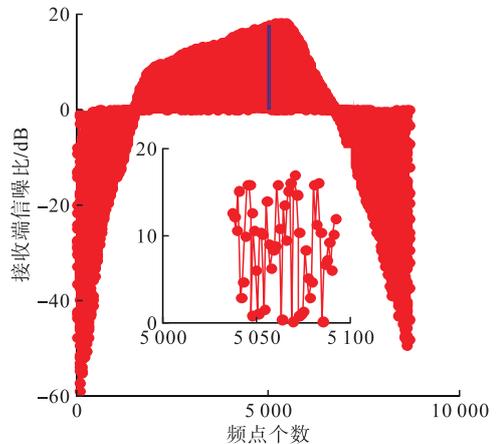


图 3 衰落条件下短波信道接收信噪比分布图

3.2 算法性能比较

采用建立链接时间的均值(mean time of building chain, MTOBC)和建链成功率(cumulative probability of success, CPOS)来比较算法之间的性能,即:

$$MTOBC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n T_i \quad (7)$$

$$CPOS(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n P_{(i,t)} \quad (8)$$

3.2.1 “最快速度”建链

“最快速度”建链的关键在于快速找到可用频点,即在全频段找到符合通信信噪比要求的频点。具体评判指标为,当信噪比高于 11 dB 时,即为可用频点。建链时间仅考虑搜索到可用频点时间,未考虑建链协议时间。

在全频段探测建链过程中,进行 100 次尝试建链,统计其建链时间、建链频点信噪比,结果如图 4~6 所示。

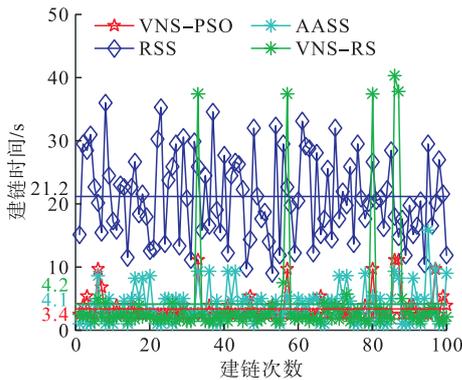


图 4 快速建链 MTOBC 分布图

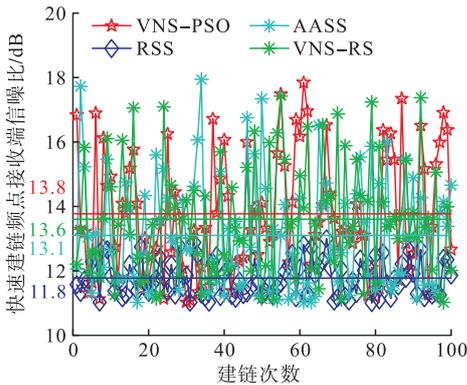


图 5 快速建链频点接收信噪比分布图

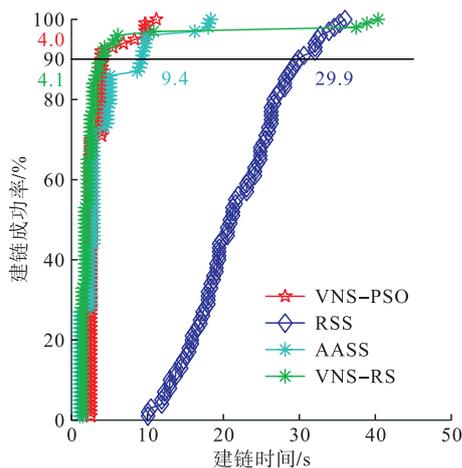


图 6 快速建链 CPOS 分布图

在“最快速度”建链时,VNS-PSO 建链初期需要划分邻域耗费一定的时间,CPOS 低于 AASS 算法,随着邻域划分完毕,CPOS 迅速提高,在 $CPOS \geq 0.9$ 时,明显优于 VNS-RS、RSS 和 AASS 算法。在建链过程中,VNS-PSO 相比 VNS-RS、AASS、RSS 算法 MTOBC 分别降低 17.1%、18%、85.5%。当 $CPOS = 0.9$ 时,VNS-PSO 算法较 VNS-RS、AASS、RSS 算法建链时间分别降低 2.5%、42.6%、81.7%,同时,平均建链接收端信噪比都高于相比 VNS-RS、AASS、RSS 算法分别提升 1.5%、5.3%、16.9%。VNS-PSO 算法在收敛性上优于 VNS-RS 算法,可以更快收敛。可以看出:VNS-PSO 算法具有快速寻找可用频点的能力,运用该算法能够提升建链速度。

3.2.2 “最优频点”建链

本文以当前整个频段最优频点 3 dB 的范围内的频点为“最优频点”,通过对比传统方法 RSS、AASS,同时,仿真了变邻域随机搜索 VNS-RS 算法,对比了各个算法的效能。

进行 100 次的建链仿真后,试验结果如图 7~9 所示,VNS-PSO、RSS、AASS、VNS-RS 4 种算法搜索到的“最优频点”均在 MIN-MAX 之间,即“最优频点”3 dB 的范围内。当 $CPOS = 0.9$ 时,VNS-PSO 算法相比 AASS、VNS-RS、RSS 算法建链时间分别降低 22.4%、22.2%、44.4%。当 $CPOS = 1$ 时,即建链成功率为 100%,VNS-PSO 算法建链时间为 69.1 s,相比 RSS、VNS-RS、AASS 算法用时更短,即 VNS-PSO 算法具有良好的收敛性。在整个建链过程中,VNS-PSO 算法相比 VNS-RS、AASS、RSS 算法 MTOBC 分别降低 11%、12.5%、45%。分析可知:VNS-PSO 算法具有搜寻“最优频点”速率快、最终收敛时间短的良好性能。在实际应用中,可以推测,VNS-PSO 在 28.8 s 时以 $CPOS = 0.9$ 的概率探测到“最优频点”。

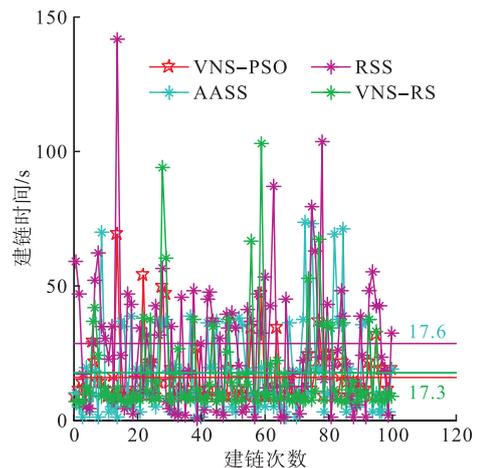


图 7 最优频点 MTOBC 分布图

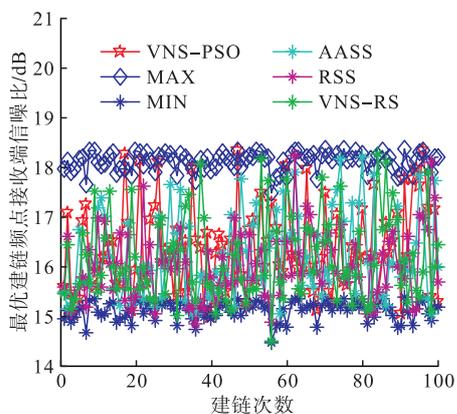


图 8 最优频点建链接收信噪比分布图

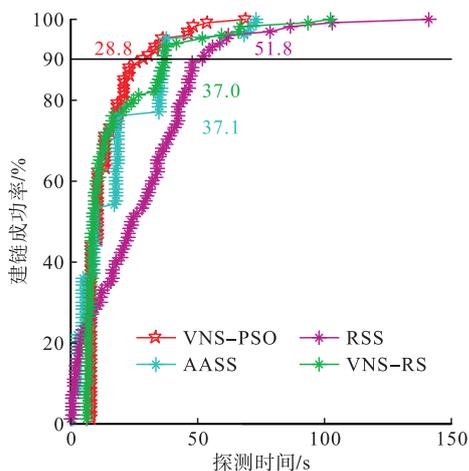


图 9 最优频点建链 CPOSS 分布图

4 结语

针对短波建链频率选择困难问题,本文分析了短波信道特征,提出了基于变邻域粒子群搜索(VNS-PSO)的短波双向探测频率选择算法。同时,利用仿真软件及实测数据,针对凝视建链模式下不同算法的建链性能进行了仿真分析。实验结果分析表明:VNS-PSO 算法在“最快速度”和“最优频点”2种建链模式下相对于 VNS-RS、AASS、RSS 具有探测建链时间短、收敛速度快、选择频点质量高的优势。

参考文献

[1] VANNINEN T, LINDEN T, RAUSTIA M, et al. Cognitive HF -New Perspectives to Use the High Frequency Band[C]//2014 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Oulu:[s. n.],2014;108-113.

[2] YAU K S B, COLEMAN C J, CERVERA M A. Investigation on Fading of High Frequency Radio Signals Propagating in the Ionosphere - Results From a Jindalee Radar Experiment[C]//2006 10th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques. London, UK:[s. n.], 2006;7-11.

[3] PROUVEZ R, BAYNAT B, KHALIFE H, et al. Modeling Automatic Link Establishment in HF Networks[C]// MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference. Tampa, FL: IEEE, 2015;1630-1635.

[4] 杜悦. 基于 3G-ALE 的短波多信道同步搜索策略的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2016.

[5] JOHNSON E E. Staring Link Establishment for High-Frequency Radio [C]//MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference. Tampa, FL:IEEE, 2015;1433-1438.

[6] 刘学宇. 基于短波中长期频率预报软件 VOACAP 的自动选频技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2013.

[7] 简相超,郑君里. 混沌和神经网络相结合预测短波通信频率参数[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001, 41(1):16-19.

[8] LING Y, JIN G, DING G, et al Fast Automatic Link Establishment: A New Metric and the Value of Spectrum Prediction [C]//2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Yangzhou, China:IEEE, 2016;1-6.

[9] 苏重阳,李雪,蔚娜,等. DRM 信号用于短波探通一体化的试验研究[J]. 电波科学学报,2018, 33(6): 677-681.

[10] 杨凯陟,叶向阳,刘金城,等. 一种新的短波实时信道估值方法 [J]. 科学技术与工程,2013, 13(23): 6717-6722.

[11] EBERHART R, KENNEDY J, A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 39-43.

[12] HANSEN P, MLADENOVIC N. An Introduction to variable Neighborhood Search [M]. Boston, MA: Springer, 1999;433-458.

[13] ABBASI M, MOKHTARI N. A. Applying VNPSO Algorithm to Solve the Many-to-Many Hub Location-Routing Problem in a Large Scale[J]. European Online Journal of Natural and Social Sciences, 2014, 3(45):647-656.

[14] MASTRANGELO J F, LEMMON J J, VOGLE L E. A New Wideband High Frequency Channel Simulation System[J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(1):26-34.

[15] US Department of Defense MIL-STD-188-110D . Interoperability and Performance Standards for Data Modems[S]. 2017.

[16] ZHAO Y, YU T. Channel Quality Correlation based Channel Probing in Multiple Channels[C]//2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). Vancouver, BC: IEEE, 2017;1-9.

[17] 崔亚笛. 短波语音增强合并技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.

(编辑:徐楠楠)