

一种基于自适应遗传算法的星地协作系统中继选择策略

陈刘伟, 梁俊, 朱巍

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 针对星地协作系统的多中继选择问题,提出一种基于自适应遗传算法的中继选择策略。与现有的选择一个中继节点的选择算法不同,该策略建立了为源节点选择一个或多个中继节点模型,以最大化目的端接收信噪比为优化目标。对陆地卫星移动通信系统进行分析,在源节点(卫星)到目的节点(地面终端)间采用解码前传模式,并在目的节点处进行等增益合并。仿真结果表明,同基于最大接收信噪比的中继选择策略相比,该策略下系统在目的端接收信噪比约提升 8 dB 且具有更高的能效;与穷举搜索策略相比在保证信噪比性能的同时能带来约 75% 的时效提升。

关键词 星地协作系统;自适应遗传算法;陆地卫星移动通信;中继选择

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.008

中图分类号 V243.1;TN927 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0041-05

A Novel Relay Selection Scheme Based on Adaptive Genetic Algorithm in Satellite Terrestrial Cooperative System

CHEN Liuwei, LIANG Jun, ZHU Wei

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

Abstract: Aimed at the problem of multiple relay selections in satellite-terrestrial cooperative system, a new relay selection scheme based on adaptive genetic algorithm(AGA) is proposed. The proposed scheme assigns one or many relay node models to a source node, and the scheme establishes an optimization model to assign one or more relays, and maximizes the received signal-to-noise ratio(SNR) at the destination. The paper analyses the land mobile satellite system(LMS), and the receiver adopts an equal-gain combining technique to implement a selective decode and forward (DF) between a source node (the satellite) and a destination node (a terrestrial station). The results show that the scheme based on AGA can improve power-efficiency and the received SNR of 8 dB, compared with the best single scheme under the condition that only one relay node with the maximum SNR is selected. And the proposed scheme can improve time-efficiency of 75%, compared with the exhaustive scheme.

Key words: satellite-terrestrial cooperative system; adaptive genetic algorithm (AGA); mobile satellite system(LMS); relay selection

收稿日期:2015-04-12

基金项目:国家自然科学基金(60972042;61202490);陕西省自然科学基金(2013ZC15008);航空科学基金(2012ZC15008)

作者简介:陈刘伟(1990-),男,安徽安庆人,硕士生,主要从事空天信息网络、协作通信研究.E-mail:clw0706@126.com

引用格式:陈刘伟,梁俊,朱巍.一种基于自适应遗传算法的星地协作系统中继选择策略[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):41-45. CHEN Liuwei, LIANG Jun, ZHU Wei. A Novel Relay Selection Scheme Based on Adaptive Genetic Algorithm in Satellite Terrestrial Cooperative System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 41-45.

卫星移动通信系统因其具有覆盖范围广、传输容量大、组网灵活、通信成本与传输距离无关、能够在大地域环境下实现手持、车载平台通信等优势,可以有效弥补地面蜂窝网络的缺陷。在卫星/地面混合网络的研究过程中,无可避免要考虑到信道的衰落的问题,地面无线移动通信系统常常采用多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术克服多径衰落的影响^[1]。但是,在卫星移动通信系统中,由于受到卫星以及地面终端设备尺寸、硬件复杂度以及制作工艺的限制,MIMO技术无法克服信道相关性的影响,导致其传输分集的优势不再明显^[2]。

近年来,协作分集技术的研究已经成为了无线通信领域的热门方向之一。1998年A. Sendonaris正式提出了协作分集的基本概念,并详细介绍了不同协作场景下的信道容量和中断概率等系统性能指标^[3]。此后,协作分集技术广泛应用在蜂窝系统、WLAN等地面移动通信系统中。

在卫星移动通信系统中,当卫星与地面节点间不存在直视路径时,会造成严重的信号衰落,此时可通过协作分集技术,提高系统的分集增益,保证信息的可靠传输。协作分集技术在地面无线通信领域的研究已取得了显著的效果,但其在卫星移动通信领域的研究尚处于起步阶段,近年来,已有一批研究人员对卫星协作通信系统开始了初步的探索^[4]。

在协作通信系统中,除了中继策略的选择外,最重要的一点是如何在众多的中继节点中选择最佳的中继节点,专家学者们对此也展开了广泛的研究^[5]。文献^[6]提出根据中继节点的地理位置进行选择,其距离基站最近者为最佳中继。文献^[7]提出了机会中继方案,这是综合考虑了中继节点与源节点和目的节点的信道瞬时信噪比后,按照特定的准则选出最佳中继节点。此选择方案的优势是不需要知道整个网络的拓扑结构,只要知道瞬时信道信息即可。文献^[8]提出的是一种选择协同的中继策略,在此策略下,源节点和中继节点可以实现信息互通,大大提高系统频谱效率。文献^[9]提出了一种动态自适应的中继节点选择算法,通过对信噪比阈值的设置与目的节点的反馈信息作为下一时隙信道状态优劣的评判,从而选择符合信道条件的中继节点进行信息的转发。

本文对多中继场景下选择多个协作节点为源节点中继进行研究,分析了该场景下中继选择的复杂度问题,结合遗传算法(Genetic Algorithm, GA),提出一种基于自适应遗传算法的星地协作系统中继选择策略,该策略具有较高的全局寻优能力和效率,有

效提升了在目的节点处的接收信噪比。

1 系统模型及问题描述

1.1 系统模型

系统模型见图1。其中,包括一个卫星(包括信关站)源点 S , L 个地面中继节点 r_1, r_2, \dots, r_L 和一个地面目的节点 D 。在地面节点采用解码前传(Decode-and-Forward, DF)中继模式,即地面中继节点在接收来自 S 的广播信号后,首先解码再重新进行信道编码,然后重传至 D 。假设每个地面终端都只配备单个天线且都能参与协作。

设卫星到目的节点的信道增益为 h_{sd} , 卫星到第 i 个中继节点的信道增益为 h_{sr_i} , 第 i 个中继节点到目的节点的信道增益为 $h_{r_i d}$, 卫星与中继节点的信号功率分别为 P_s 、 P_{r_i} 。假设各信道是相互独立的平坦衰落信道,对于接收端而言信道的状态信息(Channel State Information, CSI)是已知的。

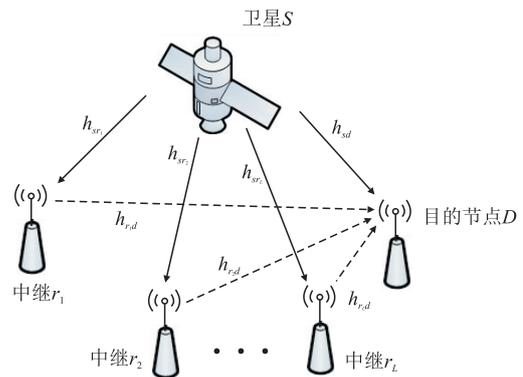


图1 基于 L 个中继节点和一个目的节点的星地协作系统

Fig.1 Satellite-terrestrial cooperative system with L relays and one destination

系统协作传输过程分2个阶段,且假设信号采用BPSK调制方式。阶段1(广播阶段),卫星同时广播信息给 L 个中继节点和目的节点。设能够对卫星信息进行正确解码的中继节点的个数为 C ,且 $C \leq L$ 。阶段2,在 C 个中继节点中选择到目的节点链路性能最优的集合进行前传信息,然后在目的节点对集合中的中继节点的信息进行等功率合并。

设在卫星 S 处发送的信号为 X_s ,则在中继 r_i 处和目的节点 D 处的接收信号分别见式(1)、(2)。

$$Y_{r_i} = h_{sr_i} \sqrt{P_s} X_s + n_{sr_i} \quad (1)$$

$$Y_d = \sum_{i=1}^C \alpha_i h_{r_i d} \sqrt{P_{r_i}} X_{r_i} + n_{r_i d} \quad (2)$$

式中: n_{sr_i} 和 $n_{r_i d}$ 分别为在中继节点 i 处和目的节点 d 处接收的加性高斯白噪声,且 $n_{sr_i} \sim N(0, \sigma_{sr_i}^2)$, $n_{r_i d} \sim N(0, \sigma_{r_i d}^2)$ 。同时 X_{r_i} 是中继节点 i 传输到

目的节点 d 的归一化信号。

$$X_{r_i} = \frac{Y_{r_i}}{|Y_{r_i}|} \quad (3)$$

α_i 用来指示中继节点 i 参与协作传输的功率系数,定义如下:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{中继节点 } r_i \text{ 参与协作} \\ 0, & \text{中继节点 } r_i \text{ 不参与协作} \end{cases} \quad (4)$$

将式(1)、式(3)、式(4)代入式(2)可得:

$$Y_d = \sum_{i=1}^C \alpha_i \frac{|h_{sr_i} h_{r_id}| \sqrt{P_s P_{r_i}}}{\sqrt{\sigma_{sr_i}^2 + P_s} |h_{sr_i}|^2} X_s + n_{r_id} \quad (5)$$

1.2 问题描述

由香农定理可知卫星节点 S 和目的节点 D 之间的瞬时互信息量为:

$$I_{sd} = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \text{SNR}_d) \quad (6)$$

式中: SNR_d 为目的节点 D 处的接收信噪比(Signal to Noise, SNR)。由式(6)可知 I_{sd} 是关于 SNR_d 的单调递增函数,因此,要求解 I_{sd} 的最大值可等价成求解 SNR_d 的最大值。

本文研究的中继选择问题就是使目的节点 D 处的接收信噪比最大,其表达式见式(7):

$$\text{SNR}_d = \frac{P_s \left(\sum_{i=1}^C \frac{|\alpha_i h_{sr_i} h_{r_id}| \sqrt{P_s P_{r_i}}}{\sqrt{\sigma_{sr_i}^2 + P_s} |h_{sr_i}|^2} \right)^2}{\sigma_{r_id}^2 + \sum_{i=1}^C \frac{\alpha_i^2 P_{r_i} |h_{r_id}|^2 \sigma_{sr_i}^2}{\sigma_{sr_i}^2 + P_s |h_{sr_i}|^2}} \quad (7)$$

令 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_C]^T$, 中继选择问题就等价成求解最优 α^* 使得 SNR_d 最大。此时,本文就是以式(8)为优化目标搜寻出最优中继选择矩阵 α 。

$$\alpha^* = \underset{\alpha}{\text{argmax}} \text{SNR}_d,$$

$$\text{s.t. } \alpha_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, C\} \quad (8)$$

由式(6)可知, SNR_d 是 α 的非线性函数,此时对最优中继选择求解问题就是非线性整数规划问题^[10]。然而对该类问题的最优解求解最有效的手段是利用穷举法对候选解集合进行遍历。特别是在中继节点数较多时,随着中继节点个数的增大候选解的个数将呈指数增长,同时对候选解集合进行遍历会加大系统开销。因此,本文提出一种基于遗传算法的自适应中继选择算法。

2 基于改进遗传算法的中继选择算法

GA 是一种随机搜索方法,由 Holland 教授于 20 世纪 60 年代首先发明^{[11]135-142}。在一系列优化和搜索问题中,GA 作为一种有效的技术已经被证明可以用于找到严格或者近似最优解。其操作流程见图 2。

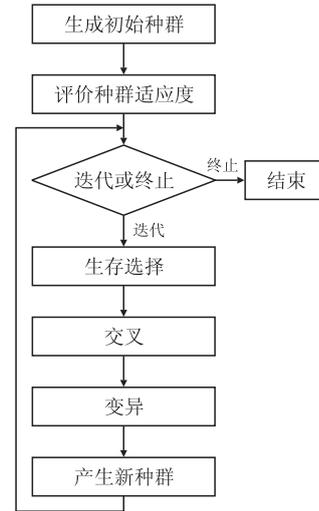


图 2 遗传算法流程框图

Fig.2 Flow chart of GA

在分析某个实际问题时,首先通过基因算法生成被称为种群的一系列随机解。该种群同时由一些染色体组成,单个染色体则由一系列带有信息被称为基因串(个体)的数据结构。进化过程一般包括生存选择、交叉、变异。在生存选择阶段,若当前最好的个体仍满足不了实际需求,将进行生存选择来筛选出适应度更优的染色体继续参与进化。协作伙伴新生成的后代继承父代的部分基因,然后进行交叉操作(也称重新组合)。上述的进化过程不断循环,直到满足预定的约束条件(如达到迭代次数或性能改善的阈值)。

本文提出的基于 AGA 的中继选择策略尤其适合中继节点数 L 较大的情况,而利用穷举搜索的方法效率将会大大减小。算法的具体描述如下:

染色体:文中 α_i 取值只能为 0 或 1,因此可直接编码成一个基因,进而序列 $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_C]$ 可表示一个染色体。

种群初始化:首先,随机产生 M_p 个染色体,同时 M_p 用作后面每一代进化的种群的大小。由文献^[12]可知, M_p 一般情况下满足 $30 \leq M_p \leq 100$ 。

适应度评估:每个染色体按照对环境的适应程度进行相应操作,根据实际问题中的适应度函数,对每一个染色体指定一个适应度值对其性能进行评估。此处采用式(7)中的目标优化函数作为其适应度函数。

生存选择:具有较高适应度值的染色体拥有高生存率,并将会继续遗传到其后代的进化过程中;而直接丢弃适应度值低的个体。该算法将根据轮盘赌选择原理(Roulette Wheel Selection)^[11]进行生存选择机制设计。那么第 j 个染色体的生存概率则可以表示为:

$$P_j = \frac{F(j)}{\sum_{j=1}^{M_p} F(j)} \quad (9)$$

式中: $F(j)$ 是染色体 j 的适应度值。

交叉:是指在种群中产生一个新成员,该成员的性能由种群中的上一代决定。首先,产生长度为 M_p 的 0、1 的随机序列。如果随机变量 $r(j)$ 小于交叉概率 $P_c(j)$,那么该染色体将被选作父辈。在选择 2 个染色体(父辈)后,在进行一次交叉操作后将会产生新的 2 个后代。本文中是单点交叉操作,即该交叉点的选择是在 2 个父代基因组中随机进行的。

变异:使 GA 具有局部的随机搜索能力和维持群体的多样性,在向最优解加速收敛的同时防止未成熟的收敛现象出现。变异概率 P_m 用来决定一个染色体是否需要变异操作。

根据适应度值和当前迭代次数,交叉概率和变异概率分别为:

$$P_c(j) = \begin{cases} P_{c_max} - \frac{P_{c_max} - P_{c_min}}{iter_{max}} \times iter, F(j) > F_a \\ P_{c_max}, F(j) \leq F_a \end{cases} \quad (10)$$

$$P_m(j) = \begin{cases} P_{m_min} + \frac{P_{m_max} - P_{m_min}}{iter_{max}} \times iter, F(j) > F_a \\ P_{m_min}, F(j) \leq F_a \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{c_max} 、 P_{c_min} 分别为设定的最大和最小交叉概率; P_{m_max} 、 P_{m_min} 为最大和最小变异概率; F_a 为 M_p 个染色体的平均适应度值; $iter$ 和 $iter_{max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

3 仿真结果及分析

仿真条件设定如下:

1) 卫星到目的节点和卫星到中继节点的链路被建模成莱斯 LMS 衰落信道^[13],地面中继到目的节点的链路被建模成 Nakagami-m 信道。

2) 各节点发射功率相同,即 $P_s = P_{r_i}$ 。

3) 中继节点和目的节点处接收的加性高斯白噪声的方差相同,即 $\sigma_{sr_i}^2 = \sigma_{r_id}^2$ 。

自适应遗传算法的相关参数见表 1。

设潜在的中继节点数为 15(即 $L=15$),分别将本文提出的策略与文献[14~15]中提出的穷举法和选取最大接收信噪比的中继节点策略进行性能比较。图 3 和图 4 分别对 3 种策略下平均 SNR 和参与中继的节点个数进行比较,本文提出的自适应遗传算法可以得到与穷举法近似的性能。图 5 通过对 AGA 与穷举法的平均用时进行比较,可以看出

AGA 能够减少 75% 的用时。

表 1 遗传算法参数物理意义及初始值

Tab.1 Parameters meaning and value

| 参数 | 物理意义 | 初始值 |
|--------------|--------|------|
| M_p | 种群规模 | 50 |
| $iter_{max}$ | 最大迭代次数 | 200 |
| P_{c_max} | 最大交叉概率 | 0.9 |
| P_{c_min} | 最小交叉概率 | 0.1 |
| P_{m_max} | 最大变异概率 | 0.4 |
| P_{m_min} | 最小变异概率 | 0.01 |

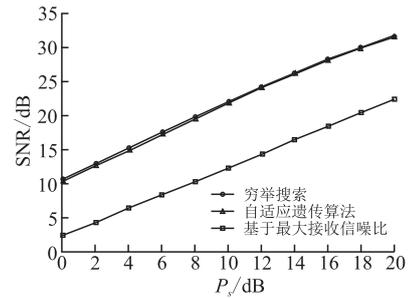


图 3 3 种策略下平均 SNR 性能比较

Fig.3 Average SNR performance of three schemes

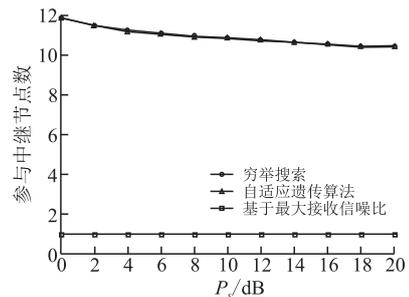


图 4 3 种策略下参与中继节点数比较

Fig.4 Selected relay nodes of three schemes

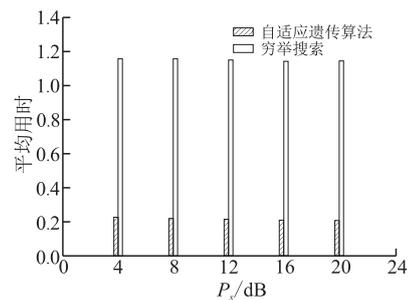


图 5 穷举搜索法与 AGA 平均用时

Fig.5 Average exhausted time of exhaustive search and AGA

图 6 给出了在 15 个中继节点场景下 3 种中继算法下的能效(信噪比与源节点和中继节点的总功率的比值)情况。进行协作通信时,需要考虑消耗的功率。从图 3 可以看到,信噪比随着功率的增大近似成线性增长,但图 6 中能效随功率的增大近似呈对数增长。当 $P_s < 10$ 时,3 种策略下的能效增长趋势近似一致;当 $P_s > 10$ 时,基于 AGA 和穷举搜索方法下的能效随功率的增大仍有较快增长,然而

基于传统中继选择算法的能效基本保持不变。因此,从能效方面考虑,基于 AGA 的策略优势依旧明显,是一种可获得最优中继的选择算法。

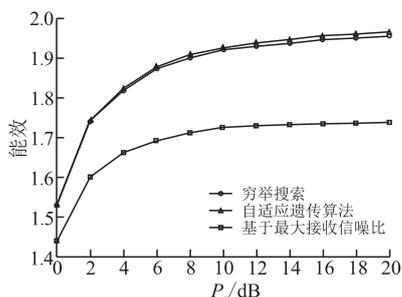


图 6 基于 3 种算法的中继策略能效

Fig.6 Power-efficiency of three schemes

4 结语

本文研究了星地协作系统多中继节点的选择问题,以最大化目的端的接收信噪比为目标。基于 GA,通过对交叉、变异概率以及种群数量和染色体的适应度值进行改进,提出了一种基于 AGA 的中继选择策略,搜寻中继选择问题的最优解。仿真结果表明,与现有的基于单个中继节点的协作模式相比,文中提出的中继选择策略可以显著提高在目的节点处的接收信噪比,且具有较强的全局寻优能力。当 L 不是很大时,本文提出的策略能够使系统性能最优;当 L 较大时,能够获得更好的时效性以及近似最优解。

参考文献 (References):

- [1] Gesber D, Shafi M, Shiu D. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3): 281-302.
- [2] Aheffen M, Fontan F P, Lacoste F. Land Mobile Satellite Dual Polarized MIMO Channel Along Roadside Trees: Modeling and Performance Evaluation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(2): 597-605.
- [3] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User Cooperative Diversity-Part I: System Description, and-Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis [J]. IEEE Transaction on Communications, 2003, 51(3): 1927-1948.
- [4] Awoyemi B, Walingo T, Takawira F. Relay Selection Cooperative Diversity in Land Mobile Satellite Systems [C]//Africon, 2013. Pointe - Aux - Piments; IEEE, 2013:1-6.
- [5] Eghbali H, Muhaidat S, Hejazi S. Relay Selection Strategies for Single-Carrier Frequency-Domain Equalization Multi-Relay Cooperative Networks [J].

IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5):2034-2045.

- [6] Sadek A K, Han Z, Liu K J R. A Distributed Relay Assignment Algorithm for Cooperative Communications in Wireless Networks [C]//IEEE International Conference on Communications. Istanbul: IEEE, 2006:1592-1597.
- [7] Bletsas A, Reed D P, Lippman A. A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.
- [8] Tannious R, Nostratinia A. Spectrally-Efficient Relay Selection with Limited Feedback [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(8): 1419-1428.
- [9] Liu T X, Song L Y, Jiao B L, et al. A Threshold-Based Hybrid Relay Selection [C]//Wireless Communications and Networking Conference Workshops. Sydney: IEEE, 2010:1-5.
- [10] 宁伟华, 陈绍顺, 王凤山. 求解整数规划的混合遗传算法 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2004, 5(6): 80-83.
NING Weihua, CHEN Shaoshun, WANG Fengshan. A Hybrid Genetic for Solving Integer Programming [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5(6): 80-83. (in Chinese)
- [11] HAUPT R L, H AUPT S E. Practical Genetic Algorithms [M]. New Jersey: Wiley, 2004.
- [12] 徐加利, 管章玉. 协作无线网络中基于遗传算法的联合中继选择与认知频谱接入机制 [J]. 新型工业化, 2014, 4(5): 41-47.
XU Jiali, GUAN Zhangyu. Joint Relay Selection and Cognitive Spectrum Access Based on Genetic Algorithm in Cooperative Wireless Networks [J]. The Journal of New Industrialization, 2014, 4(5): 41-47. (in Chinese)
- [13] Abdi A, Lau W, Alouini M S, et al. A New Simple Model for Land Mobile Satellite Channels: First and Second Order Statistics [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(3): 519-528.
- [14] Atapattu S, Jingy, Jiang H, et al. Relay Selection and Performance Analysis in Multiple-User Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(8): 1517-1529.
- [15] Sokchenda S, Benoit E, Marie-laure B. Exact Outage Probability of a Hybrid Satellite Terrestrial Cooperative System with Best Relay Selection [C]//IEEE International Conference on Communications. Budapest: IEEE, 2013:4520-4524.

(编辑:徐楠楠)