

短波通信接入网广域协作资源分配算法

李国军^{1,2}, 侯旭^{1,2}, 叶昌荣^{1,2,3}, 罗一平^{1,2}

(1. 重庆邮电大学光电工程学院/重庆国际半导体学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学超视距可信信息传输研究所, 重庆 400065;
3. 重庆邮电大学光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室博士后科研工作站, 重庆 400065)

摘要: 针对短波点对点通信可靠性不高、难以满足实际需求的问题, 提出了一种基于短波通信接入网的广域协作资源分配算法。通过调用多个站台, 分别从不同的信道对用户进行协同保障以提高短波通信的可靠性。所提算法将资源分配问题分解为信道与站台的匹配和站台分配 2 个子问题, 首先建立最大期望成功率匹配模型, 将信道与站台进行匹配, 并将分配到信道的站台组合为不同保障方案; 然后分别采用模糊层次分析法和熵权法获取方案的主客观评分, 并通过证据推理进行融合选出最优方案。结果表明, 所提算法能有效提高短波通信的成功率, 具有良好的适应性。

关键词: 短波通信; 资源分配; 模糊层次分析; 熵权法; 证据推理

中图分类号: TN925

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2023014

Wide area cooperative resource allocation algorithm for shortwave communication access network

LI Guojun^{1,2}, HOU Xu^{1,2}, YE Changrong^{1,2,3}, LUO Yiping^{1,2}

1. School of Optoelectronic Engineering & Chongqing International Semiconductor Institute College,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Lab of Beyond LOS Reliable Information Transmission, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

3. Postdoctoral Research Workstation of Chongqing Key Laboratory of Optoelectronic Information Sensing and Transmission Technology,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Aiming at the problem that short-wave point-to-point communication was not reliable enough to meet the actual needs, a wide area cooperative resource allocation algorithm based on shortwave communication access network was proposed. The reliability of the shortwave communication was improved by invoking multiple stations to coordinately guarantee users from different channels. The resource allocation problem was decomposed into two sub-problems of channel and station matching and station allocation. Firstly, the maximum expected success rate matching model was established to match the channel and the station, and the stations allocated to the channel were combined into different guarantee schemes. Then, the fuzzy analytic hierarchy process and the entropy weight method were used to obtain the subjective and objective scores of the scheme, and the optimal scheme was selected through fusion of evidence reasoning. The results show that the proposed algorithm can effectively improve the success rate of shortwave communication and has good adaptability.

Keywords: shortwave communication, resource allocation, fuzzy analytic hierarchy process, entropy weight method, evidential reasoning

收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-11-25

通信作者: 叶昌荣, yecr@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFC1511300, No.2019YFC1511301, No.2019YFC1511303, No.2019YFC1511305); 重庆市基础研究与前沿探索基金资助项目 (No.cstc2021ycjh-bgzxm0072)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFC1511300, No.2019YFC1511301, No.2019YFC1511303, No.2019YFC1511305), Chongqing Basic Research and Frontier Exploration Project (No.cstc2021ycjh-bgzxm0072)

0 引言

自然灾害发生时,由于各种公共设施被摧毁,传统的通信手段几乎失效。如何快速掌握灾区情况并发布救灾信息至关重要。短波通信是一种成本低、灵活性高的远距离通信手段,其主要的传播手段——天波传输一跳通信距离可达 100 km 以上,广泛应用于大型灾害救援等领域。由于天波依靠电离层反射进行传播,而电离层具有多变性,导致短波信道变化快、通信质量难以保障,因此如何提高短波通信的可靠性是当前亟待解决的问题。

近年来,短波通信逐渐网络化。通过将短波通信与互联网相结合,组成短波通信接入网^[1-2],接入基站之间并通过互联网进行连接,接入基站与用户之间并通过短波进行通信。短波通信接入网可以充分利用互联网的高速性和可靠性实现接入基站之间的信息互通和资源共享,同时可以充分利用分集接收^[3]技术来提高短波通信的可靠性。

传统的短波点对点通信方式通常是结合质量信息选择一条最优的信道或链路进行通信。文献[4]结合长期预测模型,给出了在加权算法下的信道质量排序的方案,并进行了最优信道的选择。文献[5]结合当前各个链路的参数,选择最优的站点接入,提高了网络的成功率和吞吐量。文献[6]利用频率预测软件分别比较了不同的发送站台与接收站台之间的链路质量,并以接收端场强中值为依据进行链路选择。但以上方法评判依据的参数较为单一,没有充分考虑当前网络的实际情况。并且当信道质量较差时,点对点的通信方式往往难以保障通信的可靠性。为了保障短波通信的可靠性,在信道质量较差时可以调用多个站台对用户进行协同保障。

针对短波点对点通信成功率低、网络资源分配困难的问题,本文提出了一种基于短波通信接入网的资源分配算法。该算法综合考虑网络情况及业务需求,通过调用多个发射端的多个站台进行协作通信,分别从不同信道对用户进行协同保障,有效提高了短波通信的成功率。

1 短波通信接入网资源分配算法

为了适应现代应急救援等需要,传统短波点对点通信方式已经难以满足实际需求。因此,需要将短波通信^[7-8]与互联网相结合,组建短波通信接入网。

短波通信接入网将多个短波接入站台合成一个

虚拟的接入节点。对于该虚拟节点,相当于配置了多个分布式的接收天线对用户上行信息进行接收,并将接收的信息递交到融合中心进行融合。同时,对于下行信息,融合中心可以结合业务需求以及当前的信道质量,调用多个站台通过不同的信道对用户进行保障。短波通信接入网充分利用互联网速度快、可靠性高的特点实现多个分布式的短波接入站台之间的信息共享和资源共享,将传统的短波点对点模式转变为点对网、网对点的接入网模式,分布式短波通信接入网示意如图 1 所示。

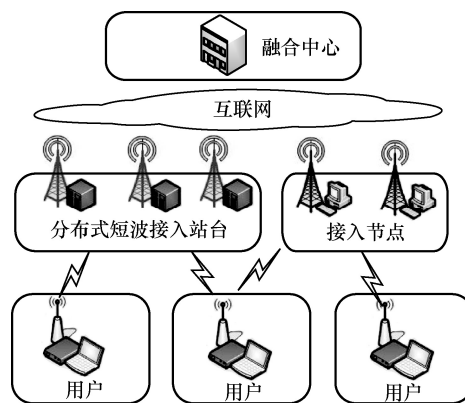


图1 分布式短波通信接入网示意

固定站台与机动用户之间的通信通常是非对称的。固定站台拥有更好的天线配置以及更灵活的功率配置,而机动用户的天线通常更加偏向于灵活机动性能上不如固定站台的天线,同时机动用户还需要考虑能量消耗等因素,功率配置不如固定站台灵活。因此,相对于固定站台到用户的下行信息,用户到站台的上行信息保障更困难。在实际通信场景中,用户难以实时掌握当前网络的情况,而接入站台间可以利用有线网络实现高效的信息互通和资源共享,从而实现高效的网络资源的分配和协同。因此,为了合理调用资源对用户进行保障并引导用户在优选频率上发送信息,可以调度多个站台,分别在不同的信道上给用户发送相同的保障信息,用户接收到不同信道到达的信息后进行融合处理,通过频率分集的方式提高下行信息的可靠性。用户在收到信息后评估各个信道的质量,将各个信道按照接收质量的高低进行排序,并依次在对应的信道上发送信息。接入基站通过将用户在各个信道上发送的信息进行整合,充分利用频率分集、时间分集、空间分集的方式最大限度地保障用户上行信息的可靠性。最后,固定站台发送一次确认信息即可完成信息的交互。因此,如何合理调用网络中的

资源对业务进行保障是决定整个系统性能的关键。本文算法将接入网资源分配问题分解为信道与站台的匹配^[9]和站台分配 2 个子问题。当需要对用户进行保障时，首先将可用信道与接入站台之间按照最大期望成功率进行匹配，匹配完成后将分配到信道的站台组合为不同的待选方案，并分别采用模糊层次分析 (FAHP, fuzzy analytic hierarchy process) 法和熵权法 (EWM, entropy weight method) 计算出各个方案组合的主客观置信度，然后通过证据推理对主客观得到的结论进行融合得到综合置信度，最终选择综合评估最优的方案进行通信。

本文的短波通信接入网结构中所有预先建立的节点均通过网络进行连接，整个网络由若干固定短波接入站台和若干机动用户组成。其中，短波固定站台通过有线网络进行互联，内部采用网络模块化方式进行连接。通过有线网络实现网内站台之间的高效信息互通和资源共享。

1.1 接入站台信道分配

在进行方案组合前，首先需要为各个接入站台分配可用信道，建立最大期望成功率匹配模型，通过整合网络可用资源，将接入网中的可用站台构建为待匹配站台集 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ ，并将可用信道构建为待选信道集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。信道匹配步骤如下。

步骤 1 信道预匹配。各个待匹配站台集中的站台根据历史实测信息从待选信道集中预选出期望成功率最高的信道，若没有实测信息，可以采用文献[10]的方法，根据频率预测软件^[11]预测对应频率的信噪比 (SNR, signal-to-noise ratio)，并绘制信道模型误码率曲线，通过误码率分别计算对应信道上行和下行的期望成功率，从而得到该信道整体的期望成功率。

步骤 2 冲突化解。若出现多个站台预选同一个信道的情况，则将预选信道相同的站台进行比较，并将信道分配给其中期望成功率最高的站台，若期望成功率相同，则分配给其中时延最小的站台。将分配到信道的站台从待匹配站台集中去除，对应的信道从待选信道集中去除，剩余站台清除预选信道结果准备进行下一轮匹配。若所有站台选择的信道无冲突，则直接将站台与对应的预选信道进行匹配。

步骤 3 完成分配。重复步骤 1 和步骤 2，直到所有接入站台完成信道匹配或待选信道集为空。然后将完成信道分配的接入站台构建为待选站台集 $Z' = \{z'_1, z'_2, \dots, z'_m\}$ ，作为后续方案组合的来源。

1.2 决策参数计算

为了合理调度多个站台对用户进行协同保障，需要对不同站台的协同效果做出评估。因此，将待选站台集中的站台组合为不同的待决策方案，并根据决策参数进行比较判决。本文采用的决策参数为方案最大站台包含数、方案期望成功率、方案代价、期望偏差、用户满意度以及方案时延，决策参数计算方式如下所述。

1) 方案最大站台包含数

在进行方案组合前，首先需要确定最多调用多少站台对用户进行保障，即方案组合中最多能包含的站台数。假设每条信道完全独立，当采用多个站台分别从不同信道上对用户进行协同保障时，用户只要能正确接收其中任意一条信道的信息则接收成功。因此方案中多个站台协同保障的成功率可由方案中所包含的每个站台单独的成功率组合计算得到。假设当前所有待选站台对应信道的平均期望成功率为 P_v ，当前业务需求的成功率为 P_n ，满足需求所需要的站台数为 N ，可得

$$P_n = 1 - (1 - P_v)^N \quad (1)$$

在调用多个站台对用户进行保障时，每多调用一个站台，最终的成功率都会提高，但同时也占用了更多资源。为了衡量收益，以每多调用一个站台提高的成功率与多占用的资源之间的比值作为收益比，令当前调用的站台数为 l ，则调用第 l 个站台的收益比 r_l 的计算式为

$$r_l = \frac{[(1 - P_v)^{l-1} - (1 - P_v)^l]}{1} \quad (2)$$

由式(2)可得，当 $l=5$ 时，在任意信道条件下，调用第 5 个站台的收益比小于 0.09。因此，建议每个方案中所包含的站台数不超过 5 个，本文采用 5 个站台作为方案组合的上限值。在实际的应用场景中，可以根据需要进行调整。

合理的方案组合需要综合考虑网络负载和可用信道情况。因此，方案包含的最大站台数 L_{\max} 计算方法如下。令当前满足业务需求所需的站台数为 N ，待选站台集中站台数为 N_a ，其中，空闲的站台资源为 N_k ，网络平均负载率为 α ，则方案包含最大站台数 L_{\max} 的计算式为

$$L_{\max} = \begin{cases} 5, & N_a \geq 5 \text{ 且 } \max\{N_k, N\} \geq 5 \\ \lceil \max\{N_k, N\} \rceil, & N_a \geq \lceil \max\{N_k, N\} \rceil \text{ 且 } N_a < 5 \\ N_a, & \lceil \max\{N_k, N\} \rceil > N_a \text{ 且 } N_a < 5 \end{cases} \quad (3)$$

其中， $N_k = N_a(1 - \alpha)$ 。

计算出 L_{\max} 后，将 1.1 节所选出的待选站台组合为包含 $1 \sim L_{\max}$ 个站台的待决策方案。例如，当前待选站台集中包含 2 个站台 A 和 B，且方案最大包含站台数为 2，则所有的方案组合为 $\{\{A\}, \{B\}, \{A, B\}\}$ 3 种。

2) 方案期望成功率

方案成功率是对方案中站台的组合效果进行整体性的评估。由于在通信用途采用 3 次交互，并且用户需要在所有接收到信息的信道上依次进行回复，因此为了更加准确地评估方案的成功率，需要结合上行成功率和下行成功率分别进行计算。设用户在方案中站台所使用的信道上依次回复时各个站台接收到的上行信息的成功率为 Pu_{ij} ，站台发送给用户的下行信息的成功率为 Pd_i ，当前方案包含的站台数为 N_d ，则方案的期望成功率 P_z 为

$$P_z = \sum_{i=1}^{N_d} \left(Pd_i \prod_{k \neq i} (1 - Pd_k) \left(1 - \prod_{j=1}^{N_d} (1 - Pu_{ij}) \right) \cdot \left(1 - \prod_{d=1}^{N_d} (1 - Pd_d) \right) \right) + \dots + \prod_{i=1}^{N_d} Pd_i \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^{N_d} \prod_{j=1}^{N_d} (1 - Pu_{ij}) \right) \left(1 - \prod_{d=1}^{N_d} (1 - Pd_d) \right) \quad (4)$$

其中， $i, j = 1, \dots, N_d$ 。

3) 方案代价

方案代价反映的是方案执行时调用网络中资源的情况，这里假设调用单个站台的代价为 1，则方案总代价 $K = N_d$ 。

4) 期望偏差

期望偏差反映了当前方案与预期调用站台数的偏差程度。令当前业务期望调用的站台数为 N_q ，当前方案包含的站台数为 N_d ，综合考虑业务需求及网络负载， N_q 的计算式为

$$N_q = \begin{cases} (1 - \alpha)N + \alpha L_q, & L_q < N \\ N, & L_q \geq N \end{cases} \quad (5)$$

其中， $L_q = (1 - a)L_{\max}$ 表示在当前负载和方案组合条件下的站台资源余量； α 表示当前网络平均负载率，当负载率较低时，应当倾向于满足业务的需求，当业务量较高时，应当倾向于考虑网络的负载情况。因此期望偏差 Q 的计算式为

$$Q = (N_d - N_q)^2 \quad (6)$$

5) 用户满意度

用户满意度反映了用户对当前方案的满意程

度。令当前业务需求成功率为 R_s ，当前组合方案成功率为 P_z ，用户满意度 R_i 的计算式为

$$\begin{cases} R_i = \frac{P_z}{R_s}, P_z < R_s \\ 1, P_z \geq R_s \end{cases} \quad (7)$$

6) 方案时延

为了反映多个站台组合方案的整体时延，本文采用方案中所包含站台平均时延作为衡量的标准。令方案中各个站台对应的时延为 dy_i ，则方案时延 dy 为

$$dy = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} dy_i, i = 1, \dots, N_d \quad (8)$$

通过上述方法，可以对各个方案的决策参数进行计算。若当前有 n 个决策因素和 m 个待选方案，则决策参数矩阵为 $D = [d_{ij}]_{m \times n}$ 。

1.3 基于 FAHP 的主观判决算法

传统的层次分析法^[12-13]是由专家根据对应的比较标度将用于决策的因素进行两两比较，得到决策因素之间的相对重要性，并构建判决矩阵计算权值向量，从而比较方案之间的优劣。但这种方法没有考虑专家判断的主观性与模糊性，导致结果存在偏差。因此需要引入三角模糊数 (TFN, triangular fuzzy number) 代替原方法中的实数矩阵，充分考虑专家将因素进行两两比较时的模糊性。三角模糊数的重要性比较尺度如表 1 所示。

表 1 三角模糊数的重要性比较尺度

模糊数	重要性比较	TFN 标度	TFN 倒数
1	相等	(1,1,1)	(1,1,1)
2	中间值	(1,1,3)	$(\frac{1}{3}, 1, 1)$
3	稍重要	(1,2,4)	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1)$
4	中间值	(1,3,5)	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1)$
5	重要	(2,4,6)	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2})$
6	中间值	(4,6,8)	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4})$
7	很重要	(5,7,9)	$(\frac{1}{9}, \frac{1}{7}, \frac{1}{5})$
8	中间值	(6,8,10)	$(\frac{1}{10}, \frac{1}{8}, \frac{1}{6})$
9	极重要	(7,9,11)	$(\frac{1}{11}, \frac{1}{9}, \frac{1}{7})$

由于短波信道不稳定、传输速率慢，在进行资源分配时需要综合考虑当前网络情况和信道的质量情况，充分恒量各个决策因素的影响。短波通信接入网资源分配是一个典型的多属性决策^[14]问题，在利用模糊层次分析法^[15-16]进行决策时，每个影响因素的权重值决定了最终决策的准确性，因此，权重的计算至关重要。

为了充分反映决策者判断的模糊性，模糊层次分析法将三角模糊数的概念引入矩阵的构建中。具体概念及计算步骤如下。

1) 三角模糊数定义

设 M 为实数域 R 上的一个模糊数，如果 M 的隶属函数 $\mu_M^{(x)}$ 满足

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x}{m-l} - \frac{l}{m-l}, & x \in [l, m] \\ \frac{x}{m-u} - \frac{u}{m-u}, & x \in [m, u] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

那么称 M 为一个三角模糊数，记为 $M = (l, m, u)$ ，其中， l 为下限值， m 为中值， u 为上限值。

2) 三角模糊数基本运算法则

设 2 个三角模糊数为 $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 与 $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ ，则这 2 个三角模糊数之间满足如下运算法则

$$M_1 \oplus M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (10)$$

$$M_1 \otimes M_2 = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (11)$$

$$\lambda \otimes M_1 = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda u_1) \quad (12)$$

$$\frac{1}{M_1} = \left(\frac{1}{l_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{u_1} \right) \quad (13)$$

3) 模糊判断矩阵构建

假设一共有 n 个影响最终决策的参数 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，由 k 个决策者对决策属性进行两两对比，即可获得判决矩阵 A^p 为

$$A^p = [a_{ij}^p]_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11}^p & a_{12}^p & \dots & a_{1n}^p \\ a_{21}^p & a_{22}^p & \dots & a_{2n}^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^p & a_{n2}^p & \dots & a_{nn}^p \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中， $a_{ij}^p = [l_{ij}^p, m_{ij}^p, u_{ij}^p]$ 为第 p 个专家给出的决策因

素 i 、 j 之间重要性的三角模糊数，其中，

$$a_{ii} = (1, 1, 1), a_{ji} = a_{ij}^{-1} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}} \right), p = 1, 2, \dots, k \text{ 为}$$

决策者的编号。

综合多位决策者，可以得到综合三角模糊矩阵 B 。令 b_{ij} 为综合三角模糊数，其值为

$$b_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k a_{ij}^p \quad (15)$$

其中， $a_{ij}^p = [l_{ij}^p, m_{ij}^p, u_{ij}^p]$ 表示第 p 位决策者给出的三角模糊数。构建的综合三角模糊矩阵为

$$B = [b_{ij}]_{n \times n} = \begin{bmatrix} (l, l, l) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \dots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (l, l, l) & \dots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \dots & (l, l, l) \end{bmatrix} \quad (16)$$

4) 指标综合程度值计算

根据综合三角模糊判断矩阵，计算每个决策因素的综合程度，计算式为

$$\tilde{P}_k = S_i \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \right]^{-1} \quad (17)$$

其中，

$$S_i = \left(\sum_{j=1}^n l_{ij}, \sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{j=1}^n u_{ij} \right) \quad (18)$$

$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n l_{ij}} \right) \quad (19)$$

5) 模糊程度比较及权向量计算

模糊数之间的程度值为

$$V(d_i) = \min [V(\tilde{P}_i \geq \tilde{P}_k)], k = 1, 2, \dots, n, \text{ 且 } k \neq i \quad (20)$$

其中， $V(\tilde{P}_i \geq \tilde{P}_k)$ 的计算式为

$$V(\tilde{P}_i \geq \tilde{P}_k) = \begin{cases} 1, & m_i \geq m_k \\ 0, & l_k \geq u_i \\ \frac{l_k - u_i}{(m_i - u_i) - (m_k - l_k)}, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

即权向量为

$$W = [V(d_1), V(d_2), \dots, V(d_n)]^T \quad (22)$$

对权向量进行归一化，有

$$\bar{W} = [V(d_1)', V(d_2)', \dots, V(d_n)']^T \quad (23)$$

其中，

$$V(d_i)' = \frac{V(d_i)}{\sum_{i=1}^n V(d_i)} \quad (24)$$

最终得到归一化权向量 \bar{W} 用于后续计算。

1.4 基于熵权法的客观判决算法

除去主观因素外，还应该充分考虑客观因素的影响。熵权法是一种根据各个决策因素所包含的信息量来确定决策因素权重的方法，即决策指标的离散程度越大，该决策指标在最终决策时所占的比重就越大。熵权法可以根据决策信息对权重进行修正，具有较高的适应性。本文利用熵权法给出客观判决的权重，具体计算步骤如下。

1) 构建决策因素矩阵

假设有 n 个决策影响因素、 m 个待决策目标，则决策因素矩阵为

$$X = [x_{ij}]_{m \times n}, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n \quad (25)$$

2) 归一化处理

归一化处理用于消除不同因素量纲的影响。

对于正向指标，有

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (26)$$

对于负向指标，有

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (27)$$

3) 熵值计算

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), j=1, \dots, n \quad (28)$$

其中， $k = \frac{1}{\ln(m)} > 0$ ，满足 $e_j \geq 0$ ； p_{ij} 为 j 项因素

下样本 i 所占比重，计算式为

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (29)$$

4) 权重计算

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, j=1, 2, \dots, n \quad (30)$$

最终得到客观权重向量 $W' = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 。

1.5 权重融合

为了对每个方案进行综合评价，采用简单加权法的方式分别计算各个决策方案的主观评分和客观评分，将决策参数矩阵 D 进行归一化处理。

对于正向指标，有

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_j^{\max} + d_j^{\min}}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n \quad (31)$$

其中， $d_j^{\max} = \max_i(d_{ij})$ ， $d_j^{\min} = \min_i(d_{ij})$ 。

对于负向指标，有

$$r_{ij} = \frac{d_j^{\max} + d_j^{\min} - d_{ij}}{d_j^{\max} + d_j^{\min}}, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n \quad (32)$$

归一化后得到矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ ，然后分别计算每个方案的主观评分和客观评分。方案的主观评分和客观评分分别为

$$\bar{C}_i = \bar{W}_i R^T \quad (33)$$

$$C'_i = W'_i R^T \quad (34)$$

其中， $i \in \{Z, K\}$ 表示分别来自主观和客观的结果。

1.6 证据推理

为了对每个方案进行综合评估，需要将主观评价与客观评价进行融合^[17]。本文采用证据理论的方法，将主客观结论进行决策融合^[18]，获得方案的融合置信度，并通过融合置信度对方案进行排序。根据各个方案组合，定义识别框架 $\Theta = \{1, 2, \dots, m\}$ ，其中， $1 \sim m$ 代表方案组合。将主客观置信度作为概率赋值 $\{m_i(0), m_i(1), \dots, m_i(m)\}$ 。主客观置信度计算式分别为

$$m_Z(i) = \frac{\bar{C}_i}{\sum_i \bar{C}_i} \quad (35)$$

$$m_K(i) = \frac{C'_i}{\sum_i C'_i} \quad (36)$$

针对2个证据源，采用 Dempster 规则进行融合。

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ m(X) = \frac{\sum_{\substack{A, B \in 2^\Theta \\ A \cap B = X}} m_Z(A) m_K(B)}{1 - \sum_{\substack{A, B \in 2^\Theta \\ A \cap B = \emptyset}} m_Z(A) m_K(B)} \end{cases} \quad (37)$$

综合以上步骤，可以计算出各方案的主客观融

合置信度 $M = \{m(1), m(2), \dots, m(m)\}$ ，最终选择融合置信度最高的方案。

1.7 资源分配步骤

综合上文，本文算法评估步骤总结如下。

步骤 1 整合网络资源，将可用信道与接入站台之间按照最大期望成功率进行匹配，并将匹配到信道的接入站台构建为待选站台集。

步骤 2 结合业务需求以及网络情况计算出方案最大站台包含数，将待选站台进行组合。根据组合情况，计算各个方案的决策参数，构建决策参数矩阵。

步骤 3 分别采用模糊层次分析法和熵权法计算出决策因素的主客观权重和客观权重。

步骤 4 将决策参数矩阵进行归一化，并分别与主客观权重进行计算，得到各个方案的主客观评分。

步骤 5 通过主客观评分计算出各个方案的主客观置信度，并采用证据推理的方式进行融合，获得每个方案的综合置信度。

步骤 6 根据综合置信度对各个方案进行排序，并选择综合置信度最高的方案对业务进行保障。

2 仿真及实测结果与分析

2.1 仿真场景搭建

为了验证本文算法的有效性和适应性，采用 OPNET 三层建模机制搭建短波多站台协同场景进行仿真验证，场景包含 5 个短波接入站台和 3 个用户。假设时间为 2020 年 11 月 5 日，仿真时间从上午 10 点开始，通过设置业务量定时产生业务，并由 5 个接入站台对用户进行保障，仿真采用多进制频移键控 (MFSK) 波形，每个信息大小为 8 B，传输速率为 60 bit/s。短波协同保障仿真场景示意如图 2 所示。

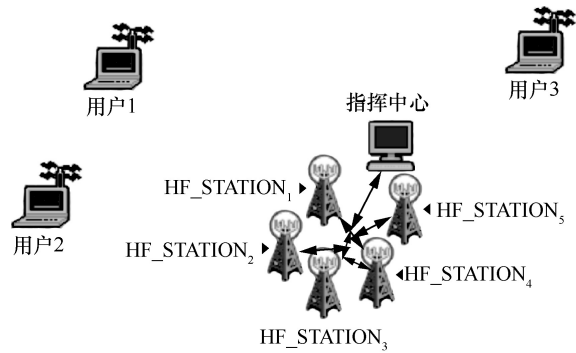


图 2 短波协同保障仿真场景示意

仿真设置 5 个可用信道对应的中心频率，分别为 7 MHz、8 MHz、9 MHz、10 MHz、11 MHz。通过将站台和用户对应的位置信息输入国际电信研讨会 (ITS) 软件中的子软件模块 ICEPAC (ionospheric communication enhanced profile analysis and circuit) 中，设置相应的频率、地理坐标等信息，获取对应频率的质量预测信息，并作为后续算法的决策信息来源，具体的建模流程和参数获取方法可以参考文献[10]。

2.2 权向量计算

针对短波广域协同场景的需求，选取方案期望成功率、方案代价、期望偏差、用户满意度、方案时延作为评估依据，并通过 1.3 节所描述的方式进行计算。其中，方案期望成功率的影响最大，方案代价、期望偏差、用户需求的影响次之，方案时延的影响最小，通过评估准则对上述因素进行两两比较，构建判决矩阵，判决矩阵如表 2 所示。通过式 (17) ~ 式 (24) 计算出权向量 $\bar{W} = [0.383, 0.260, 0.202, 0.111, 0.044]^T$ ，客观权重可以根据决策矩阵进行计算。

2.3 仿真结果与分析

为了验证本文算法的有效性，将采用本文算法

表 2 判决矩阵

参数	方案期望成功率	方案代价	期望偏差	用户满意度	时延
方案期望成功率	(1,1,1)	(1,2,4)	(1,3,5)	(2,4,6)	(4,6,8)
方案代价	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1)$	(1,1,1)	(1,1,3)	(1,2,4)	(1,3,5)
期望偏差	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1)$	$(\frac{1}{3}, 1, 1)$	(1,1,1)	(1,1,3)	(1,2,4)
用户满意度	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2})$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1)$	$(\frac{1}{3}, 1, 1)$	(1,1,1)	(1,1,3)
方案时延	$(\frac{1}{8}, \frac{1}{6}, \frac{1}{4})$	$(\frac{1}{5}, \frac{1}{3}, 1)$	$(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1)$	$(\frac{1}{3}, 1, 1)$	(1,1,1)

的多站台协同保障方案与最优单站台（选择待选站台中期望成功率最高的站台）方案进行比较。假设每小时产生的业务量为 500，用户需求的成功率为 0.95。每个业务进行 3 次交互，即固定站台发送呼叫信息，用户回复应答信息，站台再发送确认信息。每个信息大小为 8 B，并且业务平均分配到每个用户上，传输速率为 60 bit/s，在 2 种算法下，分别仿真 1 h 并每隔 5 min 统计一次业务成功率以及平均调用站台数，结果如图 3 所示。

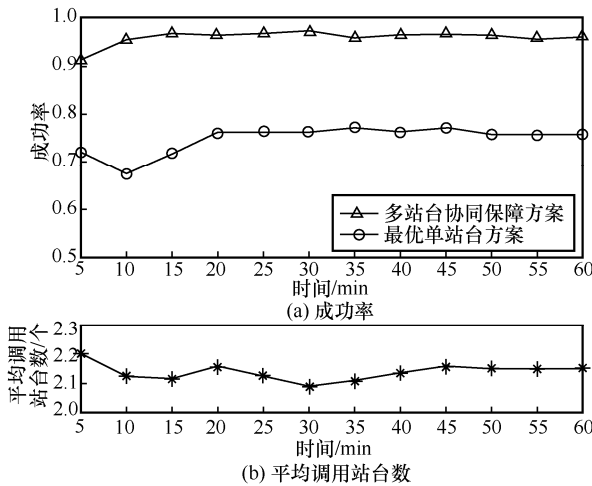


图 3 业务成功率以及平均调用站台数比较

从图 3 中可以看出，多站台协同保障方案通过调用多个站台分别从不同的信道对业务进行保障，当平均调用站台数为 2.15（即 20 min）左右时，最终的成功率达到了 96%，比最优单站台方案成功率高出了 20.4%，极大地提高了通信的成功率。

为了进一步分析算法的适应性，假设所有信道的误码率相同，调节误码率和每小时建链次数，观察本文算法在不同业务量和不同信道质量情况下的成功率以及平均调用站台数，结果分别如图 4 和图 5 所示。

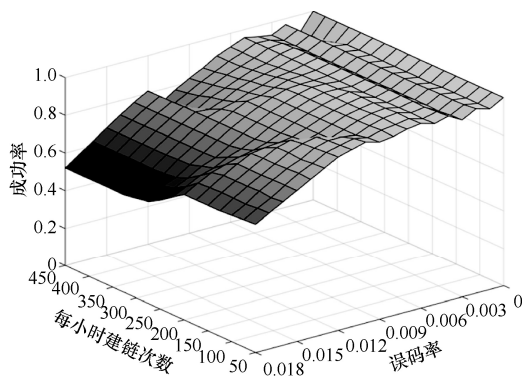


图 4 不同业务量和不同信道质量情况下的成功率

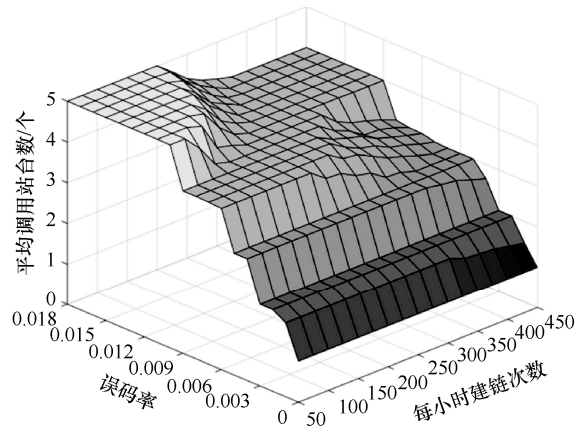


图 5 不同业务量和不同信道质量情况下的平均调用站台数

由图 4 可知，在误码率不变的情况下，随着建链次数的增加，成功率逐渐降低，这是因为建链次数逐渐增加，为了防止网络负载过高，算法对单个业务所选择的信道数减少。在同等建链次数下，随着误码率的降低，最终的成功率整体呈上升趋势，局部出现下降的原因是随着误码率的降低，算法调用的站台数逐渐减少，从而导致局部成功率低的情况。

由图 5 可知，在每小时建链次数不变的情况下，随着误码率的降低，对于支持单个业务所调用的站台数逐渐减少。而在误码率不变的情况下，随着建链次数的增加，为了防止网络崩溃，调用的站台数也逐渐减少。因此，算法能够很好地根据信道质量和网络负载情况做出动态的调整，在保障成功率的情况下合理调用资源。

2.4 实测结果与分析

为了验证本文算法在实际场景中的有效性，本文采用实验室已有短波接入站台进行测试，采用万州、酉阳、綦江 3 个固定短波接入站台对重庆邮电大学内短波电台进行保障，各个站台的地理位置分布如图 6 所示。

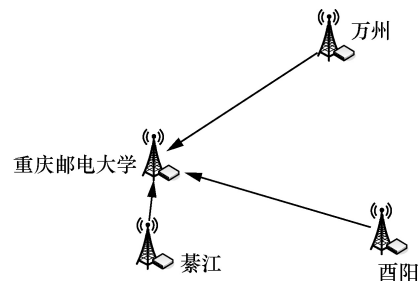


图 6 实测场景

测试时间从 2022 年 1 月 11 日 0:00 到 2022 年 1 月 11 日 23:59，进行连续 24 h 的测试，每小时各个站

台单独发起 30 次业务交互,再采用本文算法进行 30 次业务交互,通信采用 MFSK 的传输方式,实际测试采用历史测试结果作为依据,并按照 2.1 节的方法为每个站台分配信道,站台各个时段使用信道所对应的中心频率如图 7 所示。采用对应信道的历史质量信息作为算法决策参数的来源。

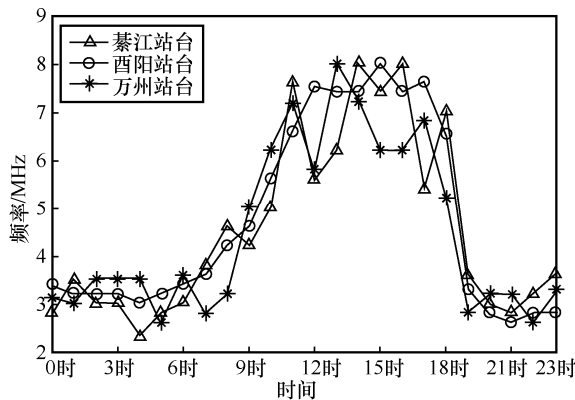
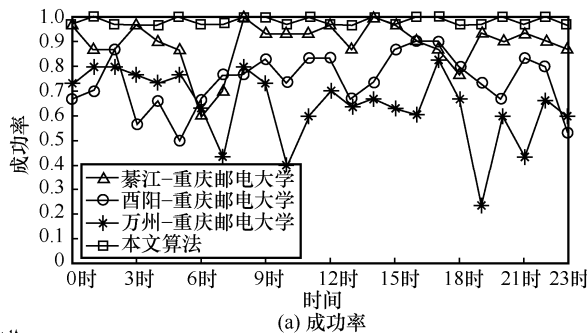
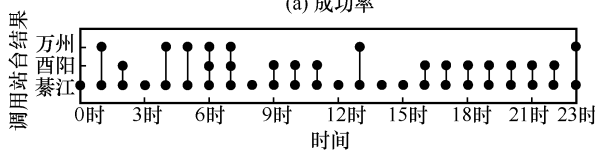


图 7 站台各个时段使用信道所对应的中心频率

接收端分别统计各个站台单独的成功率和采用本文算法所对应的成功率。成功率以及每个时段根据本文算法所调用的站台结果如图 8 所示。



(a) 成功率



(b) 每个时段根据本文算法所调用的站台结果

图 8 成功率以及每个时段根据本文算法所调用的站台结果

从图 8 中可以看出,相比于酉阳和万州,綦江-重庆邮电大学电台之间的通信质量最好,因此,根据本文算法选择綦江站台的次数最多。同时,采用本文算法可以在信道质量较差时调用多个站台进行协同,以 6 时和 7 时为例,在这 2 个时间段所有站台通信效果都较差,此时算法通过调用 3 个站台进行协同保障,将成功率提升到了 96.7%。而在 0 时、3 时、8 时、12 时、14 时和 15 时,綦江-重庆邮电

大学电台之间的通信质量较好,通过算法选择通信效果最优的綦江对业务进行保障。

由以上结果可以得出,本文算法能够通过多站台协同保障的方式将业务成功率提升到一个较高水平。在多站台协作的实景测试中,以短波电台增加一定的硬件所带来的计算开销为代价,在对短波通信有效性影响较低的情况下能够获得更高的通信成功率。同时,算法能够根据实际情况做出动态的调整,当业务量较高时,能够减少资源调用,减轻网络压力;当整体信道质量较差时,能够调用更多资源,提高成功率,具有很好的适应性。

3 结束语

本文针对短波点对点通信可靠性保障低、资源分配难的问题提出了一种短波通信接入网资源分配算法。该算法能够有效整合网络中的可用资源,并根据网络情况和业务需求合理地进行资源分配,在整体可用信道较差的情况下为业务提供相对可靠的保障。仿真与实测数据表明,本文算法能有效提高业务的成功率,很好地适应当前的实际情况并做出动态的调整。

参考文献:

- [1] 唐光亮, 刘国泽. 短波接入组网技术[J]. 通信技术, 2008, 41(6): 41-42.
TANG G L, LIU G Z. HF access technology[J]. Communications Technology, 2008, 41(6): 41-42.
- [2] 段瑞杰, 姚富强, 李永贵, 等. 基于图着色理论的短波无线接入网动态频谱分配方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(4): 94-100.
DUAN R J, YAO F Q, LI Y G, et al. Dynamic spectrum allocation method of shortwave radio access network based on graph coloring theory[J]. Computer Engineering, 2016, 42(4): 94-100.
- [3] 刘青龙, 董家山. 短波广域分集技术研究[J]. 电子技术应用, 2016, 42(6): 25-29, 33.
LIU Q L, DONG J S. Research on HF wide area diversity technology[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(6): 25-29, 33.
- [4] 刘岗, 任清华, 刘芸江. 加权算法下短波地空信道质量排序及性能评估[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(5): 137-140, 209.
LIU G, REN Q H, LIU Y J. Research on sequence of channel quality and performance assessment for HF air-ground communication based on weighted algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(5): 137-140, 209.
- [5] 刘硕, 刘芸江, 李曼, 等. 基于层次分析法的短波地空网链路优选算法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 22-26, 31.
LIU S, LIU Y J, LI M, et al. Optimization link algorithm of high frequency ground-to-air network based on analytic hierarchy process[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(1): 22-26, 31.
- [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.
- LIU X Y. Research on technologies of automatic frequency selection based on VOACAP[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [7] 李国军. 强噪声背景下短波电报信号自动检测技术研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2009.
- LI G J. Study of automatic detection techniques for high-frequency telegraph signal in strong noise environment[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2009.
- [8] 李国军, 徐小飞, 叶昌荣, 等. 面向远海岛礁环境监测的天波超视距传输技术[J]. 物联网学报, 2018, 2(3): 61-70.
- LI G J, XU X F, YE C R, et al. A transmission technology of environmental monitoring for ocean based on over-the-horizon skywave[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(3): 61-70.
- [9] 甘良才, 邹学玉, 吴燕翔, 等. 一种短波跳频网的固定信道分配算法[J]. 通信学报, 2000, 21(12): 84-89.
- GAN L C, ZOU X Y, WU Y X, et al. A algorithm for fixed channel assignment in short wave hopping network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2000, 21(12): 84-89.
- [10] 周得敏, 刘芸江, 李曼, 等. 基于 ITS 和 OPNET 软件联合的短波网络仿真方法[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(11): 16-20.
- ZHOU D M, LIU Y J, LI M, et al. A combined simulation method of HF network based on ITS and OPNET[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(11): 16-20.
- [11] 李国军, 郑广发, 叶昌荣, 等. 基于稳健卡尔曼滤波的倾斜探测电离层 MUF 短期预报方法[J]. 通信学报, 2021, 42(1): 79-86.
- LI G J, ZHENG G F, YE C R, et al. Short-term prediction method of oblique sounding ionosphere MUF based on robust Kalman filter[J]. Journal on Communications, 2021, 42(1): 79-86.
- [12] 刘军, 李晓楠. 基于层次分析法的 WLAN/蜂窝网络切换判决算法[J]. 通信学报, 2013, 34(2): 65-72.
- LIU J, LI X N. Handover algorithm for WLAN/cellular networks with analytic hierarchy process[J]. Journal on Communications, 2013, 34(2): 65-72.
- [13] 孔峰, 刘鸿雁. AHP 综合排序算法分析及其改进[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 260-263.
- KONG F, LIU H Y. Analysis and improvement on final ranking of AHP algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 260-263.
- [14] TRESTIAN R, ORMOND O, MUNTEAN G M. Performance evaluation of MADM-based methods for network selection in a multimedia wireless environment[J]. Wireless Networks, 2015, 21(5): 1745-1763.
- [15] BÜYÜKÖZKAN G, KAHRAMAN C, DA R. A fuzzy multi-criteria decision approach for software development strategy selection[J]. International Journal of General Systems, 2004, 33(2/3): 259-280.
- [16] HML A, WHZ A, SLSB C, et al. Inundation risk assessment of metro system using AHP and TFN-AHP in Shenzhen[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 56: 102103.
- [17] 杜元伟, 孙永河, 段万春. 证据理论的主客观整合推理方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(6): 41-43.
- DU Y W, SUN Y H, DUAN W C. Subjectivity and objectivity integrated reasoning approach of evidence theory[J]. Computer Engineering, 2011, 37(6): 41-43.
- [18] 李洪瑶, 李小强, 韩心中, 等. 基于决策融合的多无人机协同目标检测识别算法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 746-754.
- LI H Y, LI X Q, HAN X Z, et al. Cooperative object detection and recognition algorithm for multiple UAVs based on decision fusion[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 746-754.

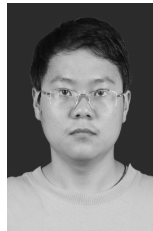
作者简介



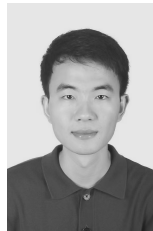
李国军 (1978-), 男, 四川资阳人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂恶劣环境超视距无线通信与网络。



侯旭 (1997-), 男, 重庆人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为短波建链技术、短波通信网络。



叶昌荣 (1989-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为短波通信、信号处理、异构链路融合组网等。



罗一平 (1996-), 男, 四川眉山人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为短波建链技术。