

文章编号:1001-893X(2012)07-1178-05

序列移相跳频组网分析与设计*

张世杰,全厚德,崔佩璋

(军械工程学院 光学与电子工程系,石家庄 050003)

摘 要:为了提高跳频网络的通信效率,提出了利用同一跳频序列的相位差异实现跳频组网的方案。首先,以 m 序列为例分析了跳频序列移相的原理和实现方法;然后,将管理通道和数据通道相分离进行序列移相跳频组网设计和网络协议规划,给出了跳频序列的移相值优化方案。该方案具有网络管理灵活方便、通信效率高、抗干扰能力强等特点。仿真结果表明,序列移相跳频组网的网间干扰与异步组网相比有较大幅度改善。

关键词:跳频组网;序列移相;频率碰撞;网间干扰

中图分类号:TN914.41 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.07.027

Design and Analysis of Sequence Phase-shifting Frequency-hopping Communication Network

ZHANG Shi-jie , QUAN Hou-de , CUI Pei-zhang

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract:To improve the efficiency of frequency-hopping(FH) communication network, FH-sequence phase-shifting is used to build FH communication network. First, the theory and method of sequence phase-shifting is analysed based on the m sequence. Second, the networking process and protocol are expounded in great detail while the system is divided into control channel and data flow channel. And a method is proposed to optimize the phase-shifting value. Such advantages as flexibility in network control, high efficiency and powerful anti-jamming performance are shown for the new designed network. The simulation results show that sequence phase-shifting FH communication network possesses a low inter-network interference compared with asynchronous network.

Key words: FH communication networking; sequence phase-shifting; frequency hit; inter-network interference

1 引 言

随着跳频通信在军事通信领域的广泛应用,如何对跳频电台和频率资源进行有效组织管理,进一步提高跳频通信网络的抗干扰能力和频谱利用率,最终实现用户间的高效通信成为一个重要的课题。

目前,链路级的跳频通信技术已比较成熟,而跳频组网的研究相对较少,主要集中在同步组网和异

步组网的性能分析和改善上,尚未提出新的跳频组网方法,如文献[1]提出了一种跳频频率表动态正交的异步组网方式,提高了异步组网的组网效率;文献[2]给出了一种基于无线自组织网络的同步组网方案;文献[3]采用两种方法分析了同步组网、异步组网的频率碰撞,为网间干扰研究提供了参考。跳频组网研究虽然取得了一定进展,但仍然存在同步组网实现难度大、异步组网效率低等问题。本文提出一种新的跳频组网方案,该方案具有建网速度快、网

* 收稿日期:2012-01-04;修回日期:2012-03-12

络管理灵活、用户间相互干扰较小等优点,具有一定参考价值。

2 常规跳频组网方式

跳频通信装备的组网主要包括频分组网和码分组网两大类。实际应用中,通常将频分组网和码分组网结合使用,以充分利用频谱资源,提高网络的抗侦察干扰能力^[4]。码分组网又可以按照是否具有统一的时间基准分为同步组网和异步组网。

同步组网时,跳频网络具有统一的时间基准,要求各网电台的跳频技术体制(同步算法、跳速、数据速率、调制解调、信道编码、跳频图案算法等)、跳频密钥和频率表等要素相同^[5]。在严格同步的情况下,通过合理的跳频序列设计,可以实现各跳频网的正交。严格同步是指各网的每一跳的起跳时刻和频率驻留时间相同,起跳点在各跳频序列的同相移点,并且要求在跳频通信过程中严格维持这种同步关系。当某一网络由于时钟漂移而产生相移偏差时,势必会造成网间干扰,网络的同步维持必须依靠高精度时钟信息的频繁交换完成,实现难度较大。实际应用中通常要求本网的主台与上级网的任一电台是同一车的车载电台时,才能实现同步组网,使用受到限制。

异步组网时,网内各网跳频参数应一致,而网与网间密钥、网号不同,没有跳频时序约束关系。异步组网最突出的优点是组织使用方便、战术运用灵活,因此成为目前最常用的组网方式。异步网缺点是网与网间存在频率碰撞问题。同一跳频频率表上的跳频网络,一般使用同一跳频序列族,网络分配不同的跳频序列。跳频序列由网号标示,作为其网络地址。由于各网之间存在频率碰撞,组网数量较少,约为跳频频率数的 1/3,组网效率不及同步组网方式。因此,在高密度组织异步跳频通信网时,要求有足够的频率资源。在频率资源日趋紧张的现代战场,该缺点严重制约了异步组网的战术运用。

3 跳频序列的相移实现

序列移相跳频组网仅使用一个跳频序列,利用跳频序列的相位差异,同时建立多条跳频通信链路。跳频电台使用的跳频序列均经过严格设计具有良好的自相关性和较长的序列周期,以对抗跳频通信的多径干扰和提高同步性能。本文以基于 m 序列构

造的跳频序列为例,介绍序列移相的实现方法。基于有限域 GF(p)上的 n 级 m 序列发生器,以发生器的 r 个相邻级控制频率合成器,称为 L - G 模型,原理如图 1 所示^[4]。

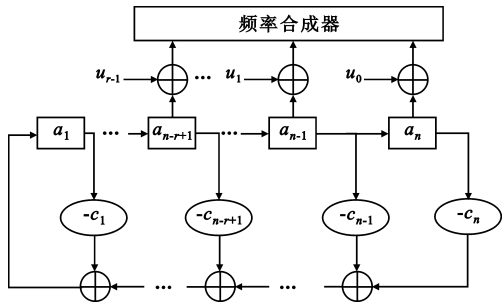


图 1 基于 m 序列 L - G 模型构造跳频序列原理图
Fig.1 Schematic diagram of frequency - hopping sequence based on the m sequence and L - G model

图 1 中, $a_1, a_2, \dots, a_n$ 为乘法器的系数, $-c_1, -c_2, \dots, -c_n$ 为初始密钥。

取 m 序列中的 r 个连续元素,逐项与 r 位网号进行运算生成跳频序列,其关系运算式为

$$s_u(j) = p^{r-1}[(a_j + u_0) \bmod p] + \dots + p^1[(a_{j+r-2} + u_{r-2}) \bmod p] + p^0[(a_{j+r-1} + u_{r-1}) \bmod p]$$

m 序列是在时钟的推动下生成的,时钟每向前推进一个单元,移位寄存器移出一位,即产生一个 m 序列元素,直至整个 m 序列产生。基于 m 序列 L - G 模型构造跳频序列时, r 个连续的 m 序列元素相关运算后得到一个跳频序列元素,并按照时钟单元依次推进,最终 $p^n - 1$ 个 m 序列元素生成 $p^n - 1$ 个跳频序列元素。由上可知,一个时钟单元对应一个跳频周期,本地时钟延时(或前移) i 个基本单元,对应将跳频序列的生成时刻延时(或前移) i 个相位,完成了跳频序列的移相。跳频序列移相原理如图 2 所示。

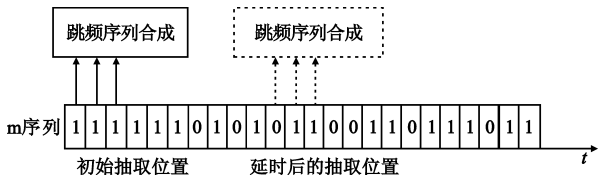


图 2 跳频序列移相原理示意图
Fig.2 Structure diagram of frequency - hopping sequence phase - shifting

造跳频序列的相移可以通过改变抽头选取 m 序

列中 r 个连续元素的时刻来实现,对应于跳频通信系统,即通过改变跳频电台本地实时时间(Time of Day,TOD)实现相移。实时时间 TOD 在电台操作面板上以“年月日时分秒”的方式显示,在电台内部以跳为单位控制跳频序列的生成。综上,改变 TOD 值可以改变频率合成器的起跳点,按照新的规律生成跳变的载波频率,实现对跳频序列的移相。

4 组网过程

4.1 基本概念

序列移相跳频组网的拓扑结构为网形,各节点处于同一等级,任意两个节点可以直接建立通信链路,各通信链路使用同一跳频序列的不同起跳点来避免相互间的干扰。序列移相跳频网络的拓扑结构示意图如图 3 所示。

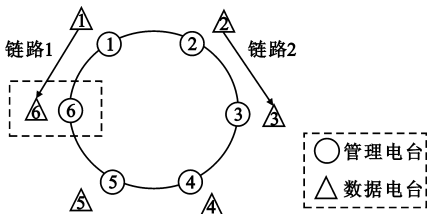


图 3 序列移相跳频网络拓扑结构示意图
Fig.3 Topological graph of sequence phase - shifting
FH communication network

网络内每一个节点分配两部电台:管理电台和数据电台,两部电台协同工作完成跳频通信。管理电台之间互通管理信息,数据电台之间互通数据信息。网内所有管理电台保持时钟同步,发送管理信息时,采用网呼形式,即将管理信息发给网内的所有节点,保证管理信息的时效性。数据电台时钟不需要维持时钟同步,数据信息的发送根据具体需要采用网呼或选呼形式。

由于每部数据电台在链路建立前均需要进行 TOD 调整,造成各数据电台的 TOD 差异较大,而管理电台的 TOD 始终保持一致,所以在确定链路起跳时刻时应以管理电台的实时时间为准。链路的起跳时刻对应于管理电台的 TOD,起跳点对应于数据电台的 TOD。

管理信息主要有两个作用:一是用于更新注册表,每次通信链路建立或结束时,发送管理信息,标示网络的运行状态的改变;二是携带数据电台的同步信息(主要为 TOD 值),完成数据电台间的跳频同

步,格式见图 4。注册表存储于管理电台内部,是管理信息的累积和更新,每次收到管理信息后,均更新注册表信息。注册表信息反映了当前网络的运行状态,包括正在工作的通信链路数,各链路的起跳时刻、起跳点、大约持续时间,处于跳频通信状态的节点等信息,为建立新的通信链路提供参考。

本地地址	呼叫地址	起跳时刻	起跳点	跳速	持续时间
------	------	------	-----	----	------

图 4 管理信息主要内容
Fig.4 Primary coverage of organized information

4.2 组网过程

设跳频网络内共有 6 个节点,在链路 1 正常跳频通信的基础上,利用序列移相方式建立链路 2 的主要过程如下:

- (1)发射机(节点 2)根据注册表信息计算跳频序列起跳点,使网内通信链路间干扰最小,根据起跳点更改数据电台的 TOD 值,确定管理信息内容;
- (2)发射机以网呼的形式发送管理信息,标示通信链路 2 建立;
- (3)网络内各节点均正确接收管理信息后,更新注册表信息;
- (4)接收机(节点 3)收到管理信息后,修正 TOD 值,与发射机建立同步,并回复确认信息;
- (5)发射机收到确认信息后,开始跳频通信,数据电台间开始互传数据;
- (6)通信完毕后,返回扫描状态,并向网络各节点发送管理信息,标示链路 2 通信结束;各节点收到管理信息后,再次更新注册表信息。

数据电台主要依靠同一节点的管理电台接收管理信息,修正数据电台 TOD 值,来实现与发射机同步。管理电台的通信状况将直接影响数据电台的同步性能,进而影响整个网络的通信状态,所以管理电台的高可靠性和管理信息的抗干扰性尤为重要,需要着重考虑。需要注意的是,网络内管理电台始终处于跳频通信状态,共享通信链路信息,使注册表能够及时更新,准确反映网络状态,为整体网络规划和建立新的通信链路提供支持。

4.3 移相位置优化

通信链路起跳点的选取主要有两种方法,一是随机选取,二是基于链路状态分析得到起跳点。本节将介绍基于链路状态分析得到起跳点的方法,使

得移相位置较优,尽可能减少链路间干扰。

为更好逼近实际电台通信性能,本方案参数设计如下:跳速500 hop/s,跳频图案生成算法如第 3 节所述,序列周期 $2^{20}-1$,跳频集数目 256。

设定当前网络共建立了两条通信链路,链路的通信状态如下:链路 1 的起跳点为跳频序列的 21 # 位置,起跳时刻为 0 s,大约通信 1 min;链路 2 的起跳点为跳频序列的 67 # 位置,起跳时刻为 10 s,大约通信 1 min。需要建立新的链路 3,新链路的跳频起跳时刻定为 20 s,大约通信 1 min。根据当前链路状态选择合理的链路起跳点,以使对正在通信的链路(链路 1、2)干扰最小,计算示意如图 5 所示。针对上述条件进行仿真分析,得到链路 3 的起跳点位置选取对在网链路的干扰程度,如图 6 所示。

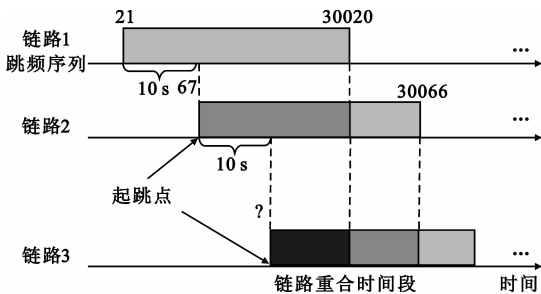


图 5 链路 3 起跳点计算示意图
Fig. 5 Diagram of initial point in link 3

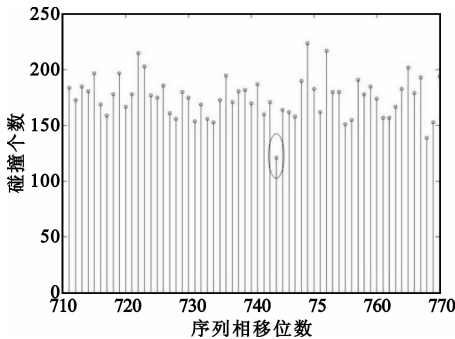


图 6 链路 3 不同相移引起的碰撞程度
Fig. 6 The collision degree originated by different phase - shifting in link 3

图 6 给出了新的链路起跳点选取后,在链路重合时间段内与两条链路频点碰撞个数的总和,一定程度上反映了链路间的相互干扰程度。方案共研究了 1 000 个相移值,仿真结果显示:相移值为 744 时,碰撞个数最小为 121;相移值为 542 时,碰撞个数最大为 235;平均碰撞个数为 174.9。故在新的链路建立时选择合适的起跳点进行移相位置优化,能够很大程度上减少链路间的相互干扰。

5 性能分析

(1)实现难度低于同步组网

序列移相跳频组网的网络同步只需实现管理电台间的同步,无需网络与网络的同步,降低了对时钟精度的要求;数据电台的跳频同步是通过管理电台间互通同步信息实现的,采用基于 TOD 的同步方法,并且对于该方法研究已经比较成熟^[6],可以实现快速精准的跳频同步。另一方面,由管理电台统一管理网络信息,能够较清楚地了解网络当前状态,方便进行高效的资源管理、链路分配和拥塞控制等,使网络的灵活性和抗毁性有较大提高。序列移相跳频组网的实现难度与同步组网相比有较大改善,与异步组网的实现难度相当。

(2)组网效率高于异步组网

独立参考模型在工程计算中应用较广泛^[2],独立碰撞模型下,异步组网时指定接收用户的每一个跳频码与其他 u 个用户的跳频码相碰撞的概率为

$$p_h = 1 - (1 - q^{-1})^{2u}$$

式中, q 为频点个数, u 为用户个数(链路数)。

根据仿真模型,进行异步组网频率碰撞仿真(考虑由于相位差异引起的左、右碰撞),并与独立碰撞模型的仿真结果进行比较。异步组网时,每个子网分配一个跳频序列,子网内部的电台通常采用 TDMA 的方式组织通信^[6],对组网效率的计算没有影响,可以将一个子网视为一条链路。比较结果如图 7 所示。

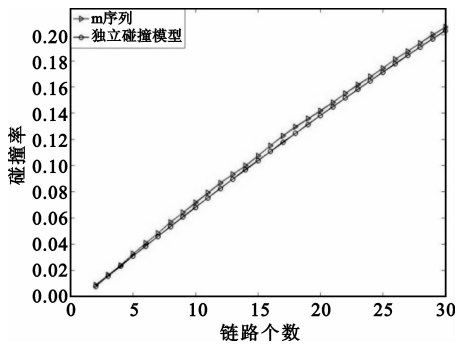


图 7 异步组网性能分析图
Fig. 7 Diagram of asynchronous network property

由图 7 可知,异步组网时链路间的相互干扰较大,当碰撞率要求为 0.1 时,约能建立 15 个通信链路,表示可以允许 15 个异步子网络同时工作。从两条曲线的拟合度可以看出该仿真模型符合独立碰撞模型,仿真结果具有一定的参考价值,仿真模型可以

进一步使用。

应用该仿真模型对新方案的组网性能进行仿真验证,图 8 分别给出了移相位置随机选取和移相位置优化处理两种情况下的组网性能。横坐标表示同时工作的链路个数,纵坐标表示跳速为500 hop/s的跳频电台工作1 min时其他链路对参考链路的碰撞率。

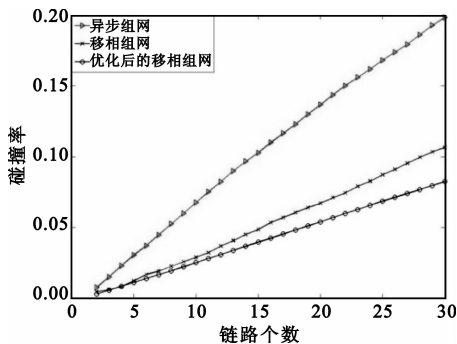


图 8 组网性能比较图
Fig.8 Comparison of network property

由图 8 可见,序列移相跳频组网的频点碰撞率要比异步组网时的小很多,移相位置优化后组网性能更优。使用相同的频谱资源,碰撞率相同的条件下,新方案可以容纳更多的通信链路,组网效率较异步组网有一定的提高。

(3)抗跟踪干扰性能较强

对跳频通信的跟踪干扰建立在有效分选跳频网台的基础上,根据目标跳频网的信号特征,引导干扰机发射频率跳变的干扰信号实施跟踪干扰。常规组网方式下,在网台分选成功后敌方实施跟踪干扰时,只能通过改变跳频频率表或跳频密钥的方式躲避干扰,影响通信效率。序列移相跳频组网方式下的跳频网在遭受到跟踪干扰时,可以改变序列相位值建立新的跳频通信链路,躲避跟踪干扰。敌方想要继续干扰则需要重新进行网台分选,降低了跟踪干扰对通信质量的影响。

6 总 结

本文利用跳频序列的良好自相关性实现跳频组网,提出了管理信息与数据信息分离发送的方法,并进行序列移相跳频组网的网络规划和组网过程设计,保证网络高效运行,实现难度远低于同步组网。仿真结果表明,新方案与异步组网相比具有较小的链路干扰,组网性能有较大提高。下一步的研究重点是通过网络资源的合理规划,提高系统的抗干

扰能力和管理信息的可靠性。

参考文献:

[1] 于龙,毛虎荣.动态正交的跳频异步组网性能分析[J]. 电讯技术,2010,50(9):110-113.
YU Long, MAO Hu-rong. Dynamic Orthogonal Frequency Hopping Asynchronous Networking Performance Analysis[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(9):110-113. (in Chinese)

[2] 徐倩.跳频同步组网技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
XU Qian. Study on Synchro-networking in Frequency Hopping System[D]. Xi'an: Xidian University,2007. (in Chinese)

[3] 张申如,益晓新,王庭昌.跳频数字通信网中的用户干扰性能分析[J].电子与信息学报,2001,23(3):222-223.
ZHANG Shen-ru, YI Xiao-xin, WANG Ting-chang. Analysis of interference property in digital frequency-hopping communication network [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2001, 23(3):222-223. (in Chinese)

[4] 梅文华,王淑波,邱永红,等.跳频通信[M].北京:国防工业出版社,2005:198.
MEI Wen-hua, WANG Shu-bo, QIU Yong-hong, et al. Frequency Hopping Communications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005:198. (in Chinese)

[5] 姚富强.通信抗干扰工程与实践[M].北京:电子工业出版社,2008:287-291.
YAO Fu-qiang. Communication Anti-jamming Engineering and Practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:287-291. (in Chinese)

[6] 刘伟.跳频电台同步技术研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
LIU Wei. Reach on Synchronization Technology of Frequency-Hopping Radio[D]. Xi'an:Xidian University,2010. (in Chinese)

作者简介:

张世杰(1988—),男,河南濮阳人,2010 年于中国石油大学(华东)获工学学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为跳频通信理论与技术;

ZHANG Shi-jie was born in Puyang, Henan Province, in 1988. He received the B.S. degree from China University of Petroleum in 2010. He is now a graduate student. His research concerns the theory and technology of frequency hopping communications.

Email: zhangshijiede@163.com

全厚德(1963—),男,辽宁大连人,博士,教授,主要研究方向为情报指挥系统、通信设备性能测试。

QUAN Hou-de was born in Dalian, Liaoning Province, in 1963. He is now a professor with the Ph.D. degree. His research concerns the information command system and the test of communication equipment.