

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.06.019

基于附加频移的跳频同步组网设计与分析^{*}

李思奇^{**}, 全厚德, 崔佩璋

(军械工程学院 信息工程系, 石家庄 050003)

摘 要:为了提高跳频同步组网的频点利用率,提出了一种基于附加频移的跳频同步组网方案。首先,给出了基于附加频移跳频通信的基本模型和收发双方的实现方案;然后,基于该跳频通信模型,给出了同步组网的网络拓扑结构。该方案在整个工作频段内能够使用所有可用频点进行同步组网,提高了频点利用率。分析结果表明,在相同子网数下,该方案较常规跳频同步组网还具有更小的碰撞概率和比特差错率,同时该方案还增加了敌方的侦察分选难度和干扰难度。

关键词:跳频同步组网;附加频移;频点利用率;碰撞概率

中图分类号:TN914.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)06-0768-05

Design and Analysis of Frequency-hopping Synchronization Networking Based on Additional Frequency Shift

LI Si-qi, QUAN Hou-de, CUI Pei-zhang

(Department of Information Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To improve the frequency utilization of frequency-hopping (FH) synchronization networking, a scheme of FH synchronization networking based on additional frequency shift is proposed. First, the model of FH communication based on additional frequency shift and the implementation of transmitter and receiver sides are presented. Then, based on this FH communication model, network topology of synchronnization networking is provided. With this scheme, all the available frequencies in the operating band can be used for synchronization networking and the frequency utilization is also improved. Furthermore, the analysis indicates that this scheme has lower hit probability and bit error rate (BER) under the same networks compared with the conventional FH synchronization networking. Meanwhile, this scheme increases difficulties for hostile reconnaissance, sorting and jamming.

Key words: FH synchronization networking; additional frequency shift; frequency utilization; hit probability

1 引 言

跳频同步组网是指各网在统一的时钟下使用同一个跳频频表进行同步跳频,各网的跳频技术体制(含同步算法、跳速、数据速率、信道编码、跳频图案算法等)相同^[1]。同步组网具有组网效率高、反侦察性能好等优点,但也存在建网过程复杂和整体抗阻塞干扰能力差等缺点^[2]。

目前,对于跳频组网的研究主要还是集中在常规跳频组网的性能分析和改进上,如文献[3-5]从跳频序列的构造和选择上给出了多址组网的性能分析,文献[6]从提高组网效率上提出了频表动态正交

的组网方式。另外,文献[7]在基于差分跳频的基础上,对其组网方式和组网性能进行了分析。

由于跳频频表内的频率数目有限,在整个工作频段内,常规跳频同步组网的频点利用率低,造成了频率资源的浪费。本文提出基于附加频移的跳频同步组网方法,旨在提高工作频段内的频点利用率。

基于附加频移跳频通信的基本模型,给出了其同步组网的网络拓扑结构。通过对频率碰撞概率、比特差错率和频点利用率的仿真计算,分析了其同步组网性能。最后还提出了基于附加频移跳频同步组网的优化方案。

^{*} 收稿日期:2012-10-26;修回日期:2013-03-12 Received date:2012-10-26;Revised date:2013-03-12

^{**} 通讯作者:lisiqi147@126.com Corresponding author: lisiqi147@126.com

2 基于附加频移的跳频通信模型

2.1 基本原理

设跳频工作频段带宽为 W , 将工作频段均分成 P 个跳频区间, 各区间可进行正交划分, 也可以设为频段重叠, 每个区间内有 q 个频点。设最小信道间隔为 Δf_m , 以各跳频区间正交划分为例, 则有

$$P \times (q + 1) = W / \Delta f_m \tag{1}$$

分别用两个跳频序列 S_u 和 S_v 控制 P 个跳频区间的伪随机跳变和 q 个频点的伪随机跳变, 这里称 S_u 为主序列, S_v 为附加序列。最后通过 S_u 控制的频率 $f_i (i = 0, 1, 2, \cdots, P - 1)$ 和 S_v 控制的频率 $k \times \Delta f_m (k = 0, 1, 2, \cdots, q)$ 的叠加, 形成最后的射频频点 $f_i + k \times \Delta f_m$ 。基于附加频移的跳频通信的频点生成方案如图 1 所示。

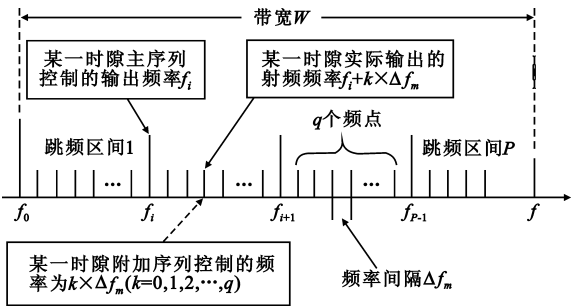


图 1 基于附加频移的跳频通信频点生成示意图
Fig.1 Schematic diagram of frequency generation of FH communication based on additional frequency shift

2.2 实现方案

由基于附加频移的跳频通信的基本原理, 收发双方的实现方案如图 2 所示。

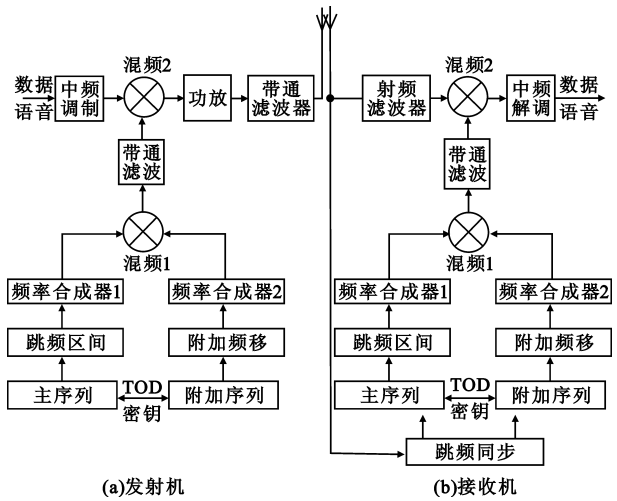


图 2 基于附加频移的跳频通信原理框图
Fig.2 Schematic diagram of FH communication based on additional frequency shift

如图 2 所示, 该原理图是基于常规跳频系统进行改进的, 与常规跳频通信系统不同的是射频频率的合成方案。TOD(Time of Day)和密钥共同决定了主序列和附加序列的生成, 主序列 S_u 从各个跳频区间取出频率控制码控制频率合成器 1 在不同时隙输出伪随机跳变的区间起始频率 f_i , 附加序列 S_v 从附加频移中取出频率控制码控制频率合成器 2 在不同时隙输出伪随机跳变的附加频率 $k \times \Delta f_m$, 两频率信号通过混频器 1 和带通滤波后可得到叠加的射频频率 $f_i + k \times \Delta f_m$ 。

以超短波频段 (30 ~ 87.975 MHz) 为例, 信道间隔 Δf_m 为 25 kHz, 则可用频点数约为 2 320 个。常规跳频一次通信的频点数通常为 256 个, 而基于附加频移的跳频通信的可用频点数则可达到 2 320 个。

3 网络拓扑结构

基于附加频移的同步组网主要分为主从同步、互同步和外基准同步^[8]。主从同步和互同步的结构如图 3 所示。

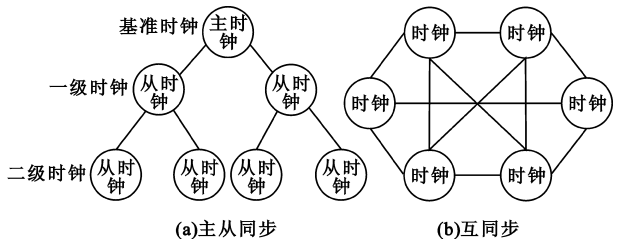


图 3 同步网络结构图
Fig.3 Structure diagram of synchronization networks

外基准同步法是指专门的时间基准部门发送的基准频率信号, 如全球定位系统 (GPS) 和“北斗”定位系统等发送的导频信号。

按照主从同步的方法, 基于附加频移的跳频通信可以根据指挥和作战单位的隶属关系按照图 4 所示的网络拓扑结构进行组网通信。

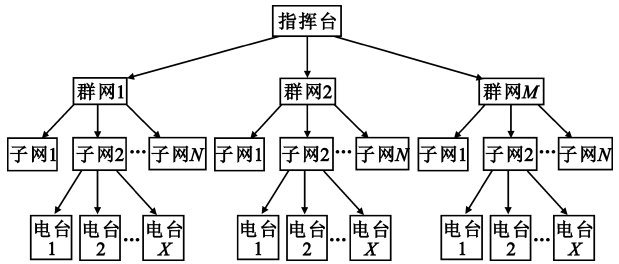


图 4 主从同步网络拓扑结构
Fig.4 Topological structure of master-slave synchronization networks

在整个通信网络中,指挥台处于所有跳频网的指挥中心,负责广播组网模式及分发组网协议,同时作为时钟参考站,负责发送同步信息,其他各网电台为普通站,用于接收主台的同步信息,达到全网时钟同步。

各群网可按照不同的跳频主序列进行划分,则群网相当于进行码分多址(CDMA)接入,各群网内又按照不同的跳频附加序列组成各子网,子网也等同于码分多址(CDMA)接入。各子网内的电台数量可以根据实际需要进行增减,子网内的各电台可按照时分多址(TDMA)接入或载波侦听多址(CSMA)接入的方式,也可以按照附加序列移相^[9]的方法进行多用户并行通信。两种用户的多址接入方式如图 5 所示。

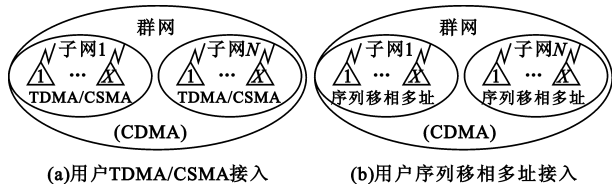


图 5 两种用户多址接入方式
Fig.5 Two multiple access methods

图 5(b)中用户多址接入的方式等同于增加了子网接入数,则以下分析主要针对图 5(a)中的用户多址接入方式,且均以超短波频段为例。

4 同步组网性能分析

4.1 频率碰撞概率

假设基于附加频移的跳频通信同步网中共有 N 个子网,则由独立碰撞模型可知^[10],设工作频段内共有 q 个频点,则参考用户的某个频点与其他 $N-1$ 个用户当前频点碰撞的概率为

$$P_h = 1 - (1 - q^{-1})^{N-1} \quad (2)$$

如果跳频序列长度为 L ,则在 L 个频点中恰有 i 个频率发生碰撞的概率为

$$P(L, i) = C_L^i (P_h)^i (1 - P_h)^{L-i} \quad (3)$$

由式(2)可知,在相同子网数的条件下,增大频点数 q 能使碰撞概率 P_h 减小,则基于附加频移同步组网和常规跳频同步组网在相同子网数下的碰撞概率如图 6 所示。

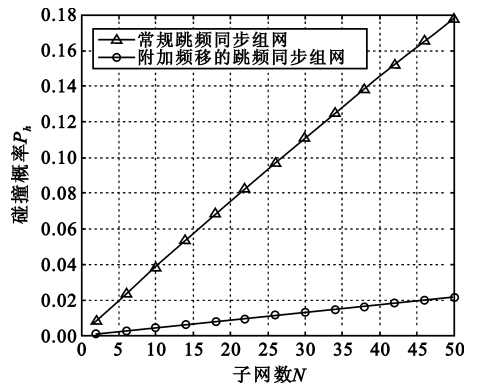


图 6 子网数与碰撞概率关系图
Fig.6 Relationship between subnet numbers and hit probability

从图 6 可以看到,基于附加频移的跳频同步组网在相同的子网数下碰撞概率小于常规跳频同步组网,这是因为基于附加频移的跳频通信增大了可用频率数。

4.2 比特差错率

设调制方式为 FH/MFSK,采用非相干解调,则没有发生频率碰撞时的比特差错率为^[11]

$$P_e = \frac{1}{2(M-1)} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \sum_{i=2}^M \binom{M}{i} (-1)^i \exp\left(\frac{E_b(2-i)}{2N_0 i}\right) \quad (4)$$

其中, $l = \text{lb} M$, E_b 为每比特的信号能量, N_0 为高斯白噪声的单边功率谱密度,如果在某一频点上发生了碰撞,则可以假设由此造成在该频率上的错误概率为 $1/M$,则总的比特差错率为

$$P_e = \frac{1}{2(M-1)} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \left[\sum_{i=2}^M \binom{M}{i} (-1)^i \exp\left(\frac{E_b(2-i)}{2N_0 i}\right) \right] \cdot (1 - P_h) + \frac{1}{M} P_h \quad (5)$$

当子网数 N 一定的条件下,假设频率数目 q 非常大,则式(2)可近似为

$$P_h = 1 - \left(1 - \frac{1}{q}\right)^{N-1} \approx \frac{N-1}{q} \quad (6)$$

将式(6)中 P_h 的表达式代入式(5)中,则比特差错率可写为

$$P_e = \frac{1}{2(M-1)} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \left[\sum_{i=2}^M \binom{M}{i} (-1)^i \exp\left(\frac{E_b(2-i)}{2N_0 i}\right) \right] \cdot \left(1 - \frac{N-1}{q}\right) + \frac{1}{M} \left(\frac{N-1}{q}\right) \quad (7)$$

如果 E_b/N_0 非常大,则有

$$\lim_{\frac{E_b}{N_0} \rightarrow \infty} (p_e) = \frac{1}{M} \left(\frac{N-1}{q}\right) \quad (8)$$

设信噪比 E_b/N_0 为 12 dB,则子网数与比特差错率之间的关系如图 7 所示。

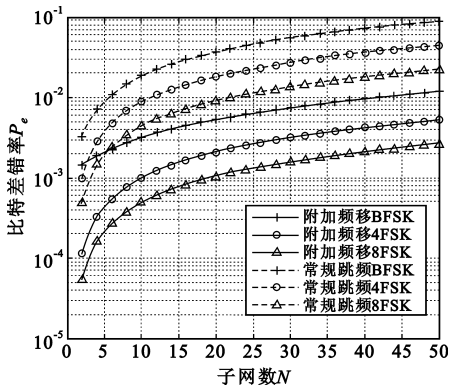


图 7 子网数与比特差错率关系

Fig. 7 Relationship between subnet numbers and BER

由图 7 可以看到,随着子网数 N 的增加,两种跳频模式的比特差错率 P_e 均在增大,但是在同样的调制模式下,基于附加频移的同步组网比特差错率低于常规跳频的比特差错率。另外,从图中还可以看到,对于同种模式的跳频同步组网,更高进制的调制方式对应的比特差错率更小,则在相同的子网数下,还可以选择更高进制的 FSK 调制来减小同步组网的比特差错率。

4.3 频点利用率

对于跳频同步组网,频点利用率 η 可定义为子网数 N 实际所用频点数 q 占工作频段总频点数 Q 的百分比,则有

$$\eta = \frac{q}{Q} \leq 1 \tag{9}$$

对于常规跳频同步组网,频点利用率为 $256/2320 = 11.03\%$,对于相同的子网数 N ,基于附加频移的跳频同步组网频点利用率可达到 100%。

频点利用率越高,说明频率资源利用越充分,避免了频谱资源的浪费。从抗干扰的角度,频点利用率越高,系统的抗阻塞干扰能力越强,特别是抗多频以及梳状干扰能力。

提高频点利用率还有利于提高抗跟踪干扰能力。一方面,提高频点利用率,增大了敌方侦察分选的难度,使敌方难以确定通信网的干扰目标和干扰频率集;另一方面,还使得跟踪干扰机需要更大的干扰带宽和频率集,增大了敌方的跟踪干扰难度。

5 同步组网优化

为了减小碰撞概率和增大抗干扰性能,可以对基于附加频移的跳频同步组网进行优化设计,主要根据群网和子网的数量配置进行优化。

根据不同的网系规划,群网数量和各子网数量可以任意增减,则根据群网数和子网数的变化,工作频段的跳频区间的带宽大小也应该随之改变,其变化关系如图 8 所示。

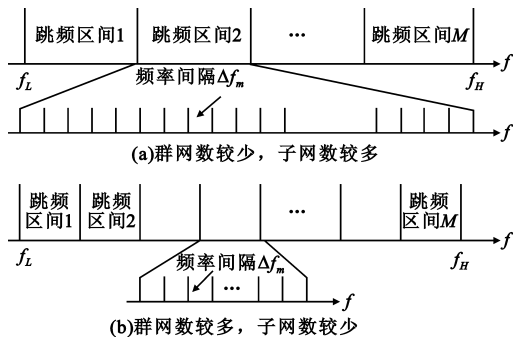


图 8 跳频区间带宽与子网数变化关系图

Fig. 8 Relationship between subnet numbers and FH sections

如图 8 所示,当群网数 M 较少、子网数 N 较多时,可将跳频区间的带宽设置得较大,则相应的跳频区间数 P 减少,每个区间内的可用频率数 q 增多。但是为了减小网间频率碰撞概率,应使得 $P \geq M$,即跳频区间数应大于或等于群网数。这样设置的目的是在群网数一定的条件下,能够增加子网容量而不会造成碰撞概率的增大,而且使得各子网能在整个工作频段内更加均匀的分布,增大敌方侦察分选的难度和干扰的难度。

当群网数 M 较多,而子网数 N 较少时,可将跳频区间的带宽设置得较小,则相应的跳频区间数 P 增加,每个区间内的可用频率数 q 减少。这样设置的目的是为了减小频率碰撞概率。

6 结 论

本文针对常规跳频同步组网频点利用率低的缺点提出了一种基于附加频移的跳频同步组网方案。通过分析可知,在相同的子网数下,基于附加频移的跳频同步组网具有更高的频点利用率和更低的频率碰撞概率和比特差错率。最后根据不同的网络数量配置对基于附加频移的跳频同步组网进行了优化,进一步减小了碰撞概率和提高了抗干扰性能。

但应注意到,基于附加频移的跳频同步组网在网间同步和电台间的收发同步上较常规跳频同步组网更复杂,而且存在较大的时间延迟,这也是今后重点研究和改进的方向。

参考文献:

[1] 梅文华,王淑波,邱永红,等. 跳频通信[M]. 北京:国防

- 工业出版社,2005:199-201.
- MEI Wen-hua, WANG Shu-bo, QIU Yong-hong, et al. Frequency Hopping Communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2005:199-201. (in Chinese)
- [2] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 北京:电子工业出版社,2008:288-291.
- YAO Fu-qiang. Anti-jamming Engineering and Practice in Communication[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2008:288-291. (in Chinese)
- [3] 杨迎辉,李建华,王刚,等. 异步组网跳频序列选择问题建模与优化[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2011,12(6):65-68.
- YANG Ying-hui, LI Jian-hua, WANG Gang, et al. Modeling and Optimization of Asynchronously Organized Networks Frequency Hopping Sequence Selection Problem[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2011,12(6):65-68. (in Chinese)
- [4] 李赞,常义林,蔡觉平. 基于分组密码的跳频序列多址接入性能分析[J]. 通信学报,2005,26(4):130-134.
- LI Zan, CHANG Yi-lin, CAI Jue-ping. Analysis of multi-access performance on block cipher based FH sequences[J]. Journal on Communications, 2005, 26(4):130-134. (in Chinese)
- [5] 冯莉芳,汪晓宁,叶文霞,等. 基于无碰撞区跳频码的准同步组网方案[J]. 西南交通大学学报,2004,39(6):776-779.
- FENG Li-fang, WANG Xiao-ning, YE Wen-xia, et al. Quasi-synchronous Scheme for Frequency Hopping System Based on No-Hit-Zone Hopping Code[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004,39(6):776-779. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 赵丽屏,姚富强,李永贵. 差分跳频组网及其特性分析[J]. 电子学报,2006,34(10):1888-1891.
- ZHAO Li-ping, YAO Fu-qiang, LI Yong-gui. The Making-Up of Differential Frequency Hopping(DFH) Network with Its Characteristics [J]. Acta Electronica Sinica, 2006,34(10):1888-1891. (in Chinese)
- [8] 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. Research on Synchronization Networking Technology of Frequency-Hopping[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
- [9] 张世杰,全厚德,崔佩璋. 序列移相跳频组网分析与设计[J]. 电讯技术,2012,52(7):1178-1182.
- ZHANG Shi-jie, QUAN Hou-de, CUI Pei-zhang. Design and analysis of sequence phase-shifting frequency-hopping communication network [J]. Telecommunication Engineering, 2012,52(7):1178-1182. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2008:228-230.
- FAN Chang-xin, CAO Li-na. Communication Theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008:228-230. (in Chinese)

作者简介:



李思奇(1988-),男,四川内江人,2011年于西南交通大学获电子信息工程专业学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为跳频通信理论与技术;

LI Si-qi was born in Neijiang, Sichuan Province, in 1988. He received the B.S. degree from Southwest Jiaotong University in 2011. He is now a graduate student. His research concerns theory and technology of frequency hopping communications.

Email: lisiqi147@126.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 information command system and test of communication equipment.

崔佩璋(1974-),男,山西长治人,2005年获工学硕士学位,现为讲师,主要研究方向为通信与信息系统。

CUI Pei-zhang was born in Changzhi, Shanxi Province, in 1974. He received the M.S. degree in 2005. He is now a lecturer. His research concerns communication and information system.