

差分跳频组网及其特性分析

赵丽屏, 姚富强, 李永贵

(总参第63研究所, 江苏南京 210007)

摘要: 本文在阐述短波差分跳频原理的基础上, 首次提出了差分跳频组网所需要的参数种类, 重点分析了其组网方式, 扩展了跳频同步组网的定义范围, 并重点对差分跳频异步组网性能进行了相应的理论推导, 利用概率统计的方式, 探讨了差分跳频异步组网的网间多址干扰概率与组网数的关系, 研究了异步组网效率与网间多址干扰概率的关系, 得出了一些有益的结论。

关键词: 跳频电台; 差分跳频; 跳频组网

中图分类号: TN914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)10-1888-04

The Making Up of Differential Frequency Hopping(DFH) Network with Its Characteristics

ZHAO Li-ping, YAO Fu-qiang, LI Yong-gui

(The 63rd Research Institute of the General Staff Headquarters, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: Based on the principle of high frequency(HF) DFH, this paper preliminarily proposed the classification of parameters for the first time, which DFH network make up needed, studied its network make up method, extended implication of synchronous frequency hopping network make up, and paid emphases on the derivation of the theoretical characteristics of the network making up asynchronously by taking the method of statistics, discussed the relationships between the multiple access interfere probability and the numbers in a asynchronous DFH network, as well as with the corresponding relationships between the efficiency and the multiple access interfere probability, then obtained some good conclusions finally.

Key words: high frequency(HF) radio, differential frequency hopping(DHF), frequency hopping network make up

1 引言

20世纪90年代, 美国Sanders公司率先推出了一种相关跳频增强型扩频电台(Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum), 简称CHESS电台^[1-3], 引起了国际通信学术界的重视, 它从差分跳频(DFH)体制出发, 较好地解决了提高短波数据传输率和抗跟踪干扰等问题。目前, 国内外对差分跳频体制、跳频控制算法以及跳频图案等作了一些较深入的研究^[1-4], 但对其组网问题至今未见报道, 而这一问题又直接关系到差分跳频体制的实用性, 涉及到差分跳频组网参数有哪些、组网方式和性能如何及其与传统跳频组网方式的异同点等方面, 本文试图对这些问题作相应的分析。

2 差分跳频的基本原理

DFH的基本思想^[1-5]是: 发送端当前时刻的频率值 f_n 由上一跳的频率值 f_{n-1} 和当前时刻的信息符号 X_n 决定。可用一个隐式差分方程表示为:

$$f_n = G(f_{n-1}, X_n) \quad (1)$$

$$X_n = G^{-1}(f_{n-1}, f_n) \quad (2)$$

其中, G 是一个特定的函数, 由它决定 DFH 的数据到频率的映射。短波 DFH 跳频的核心技术和体制主要集中在 G 函数的算法上。由式(1)、(2)可知, 相邻跳变频率之间通过数据序列建立了一定的相关性, 亦即相邻频率的相关性携带了待发送的数据信息, 所以也将这种跳频称之为相关跳频。

3 差分跳频组网参数种类及分析

由差分跳频原理可见, G 函数需要一个起始频率才能根据当前数据信息映射出下一跳频率。尽管收端采用异步跳频方式进行数字化宽带接收, 仍然需要建立帧同步, 才能保证数据的解调。考虑到帧同步的保密性和安全性, 应对帧同步设置初始密钥, 再将初始密钥与TOD进行非线性运算产生流动密钥, 以保证帧同步模式的时变性, 使不断变化的帧同步模式既不易被人为破译, 而通信接收端又能正常接收到帧同步信号。同时, 帧同步模式中还需要携带网号等信息。各网电台根据接

收到的帧同步模式, 只接纳本网的数据信息. 因此, 差分跳频电台组网时帧同步频率、帧同步密钥 KEY、实时时钟 TOD 及网号 NET 等是必不可少的参数, 组网时需要的其它参数还有: 频率表 FRQ、起始频率及扇出系数等. 它们的意义和作用如下:

频率表: 是由 N 个频率组成的一个跳频频率集, 用于跳频通信, 记为 $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$.

实时时钟: 代表跳频帧同步所需的伪码发生器实时状态, 简称 TOD (Time of Day), 参与产生帧同步模式的非线性运算, 以形成帧同步所需的流动密钥.

帧同步密钥: 决定跳频帧同步所需的伪码发生器的初始状态.

网号: 表征差分跳频电台所组成的跳频网的代号.

起始频率: 即差分跳频电台的起跳频率或每帧的起跳频率.

帧同步频率: 传输 DFH 帧同步信号的工作频率, 由 M 个频率组成的一个频率子集, 记为 $\{F_1, F_2, \dots, F_M\}$, 一般情况 $\{F_1, F_2, \dots, F_M\} \subset \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, 在跳频通信频率集中选取, 且帧同步频率是时变的.

扇出系数 (m): 表明由当前频率转移到下一个频率子集的频率数量, 与每跳携带的信息比特数有关.

传统跳频电台组网参数种类主要有: 频率表、实时时钟、跳频密钥、网号及同步频率集^[6]等, 其意义和作用如下:

频率表: 意义上同.

实时时钟: 代表跳频同步所需的伪码发生器实时状态.

跳频密钥: 决定跳频图案所需的伪码发生器的初始状态.

网号: 意义上同.

同步频率: 传输跳频同步信息所用的频率, 由 M 个频率组成的一个频率子集, 记为 $\{F_1, F_2, \dots, F_M\}$, 一般情况 $\{F_1, F_2, \dots, F_M\} \subset \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, 在跳频通信频率集中选取, 且同步频率是时变的.

由以上比较可知, 传统跳频电台组网参数和差分跳频电台组网参数有些相同, 比如: 跳频频率表、网号等; 有些不同, 比如: 起始频率、初始同步频率、帧同步频率、扇出系数等; 有些名称相同, 但用途不同, 比如: 实时时钟 TOD 参数和密钥参数等.

4 差分跳频组网性能分析

由于差分跳频的原理与传统跳频的原理有着很大的差别, 造成它们的组网性能也有很大的不同. 例如: 传统跳频电台组网时相同频率造成频率碰撞, 形成多址干扰, 而频率不同时不构成多址干扰; 对于差分跳频电台来说, 不同频率可能会造成接收方数据的误判, 从而形成多址干扰; 频率相同时, 如果削弱有效频率的幅度, 则形成多址干扰, 如果加强频率的幅度, 则不形成多址干扰, 与两个频率之间的相位有关.

4.1 同步组网性能分析

传统的同步组网^[9]是指各跳频网在技术体制、跳频图案算法及跳频密钥相同以及同一张频率表的条件下, 各跳频网每一跳的起跳时刻相同, 并且任一时刻的各网瞬时频率正交

(即不相同). 由于传统的同步组网是同频造成多址干扰, 而差分跳频则是异频可能会形成多址干扰. 因此差分跳频同步组网的概念应扩展为在同一张频率表的条件下, 各跳频网每一跳的起跳时刻相同时, 任一时刻各网瞬时频率不相互形成干扰.

差分跳频图案是由随机数据信息控制 G 函数产生的, 而每部电台和各跳频网的数据源是不同的, 是相互独立的, 相互之间不可能有某种约束关系, 导致了即使各台及各网之间在时间上有约束关系, 也难以实现各台各网之间频率的人工干预. 这样一来, 当接收方收到的频率为当前 G 函数映射出的除当前发送频率之外的 $m-1$ 个频率中的某一个频点时, 就会形成多址干扰, 也就是说, 要做到差分跳频各网当前跳变频率不落在其余网 G 函数映射的频率子集之内是相当困难的. 需要通过研究 G 函数的算法, 寻找适当的映射途径, 使得各网跳变时刻相同, 但任一时刻各网瞬时频率不相互形成多址干扰. 这一问题不是本文讨论的重点.

4.2 异步组网性能分析

所谓异步网^[5]是指各跳频网之间的起跳时刻、跳频图案没有约束关系的组网方式. 其频率表的设置有两种类型, 一是各异步网的频率表相互独立, 没有相同的频率, 或分频段设置, 或频率交叉设置, 即使多个异步网同时工作也不会形成多址干扰. 二是各异步网有部分频率相同或用一张频率表组多个异步网(即全部频率相同), 此时多个异步网同时工作时, 各网之间可能会形成多址干扰. 下面即在这种定义前提下, 通过建立差分跳频网间多址干扰模型, 讨论差分跳频异步组网问题.

(1) 各异步网的频率表相互独立时

在这种情况下, 由于频率表相互独立, 所以各异步网在某一时刻的频率一定不同, 尽管差分跳频在频率不同时可能形成多址干扰, 但由于此时各异步网对应的 G 函数所映射频率表不同, 按照 G 函数的算法当前频率只能在本张频率表中映射产生, 当收到不同频率时, 只要不在本频率表内, 便不满足 G 函数正反变换的约束, 因而不影响对数据的判断, 也就不形成多址干扰. 不过, 这种方法需要占用较大的频率资源.

(2) 各异步网的频率表有交叠时

(a) 各异步网共用一张频率表时

Q 个网异步工作时, 由于共用一张频率表, 存在异频形成网间多址干扰的可能. 但是, 当接收方收到不同的频率时, 只有在收到的频率为当前 G 函数映射出的除当前发送频率之外的 $m-1$ 个频率中的某一个频点时, 才会对接收方形成多址干扰, 否则不造成影响. 如图 1 所示(其中: BPH 为每跳携带的信息比特数, 则扇出系数 $m = 2^{BPH}$). 这种情况和差分跳频同步组网是不同的, 因为同步网在任一时刻各网瞬时频率一定不相互形成干扰, 但对于同频率表的异步网则不可能在任一时刻各网瞬时频率一定不相互形成干扰.

设当前频率为 f_0 , 由 G 函数映射出的下一跳可能的频率为: f_1, f_2, f_3, f_4 . 如果下一跳的频率为 f_1 , 则只有当其它网的频率为 f_2, f_3, f_4 时, 才会对该网形成多址干扰. 如果是 f_1 , 最坏的影响就是该频率幅度的削弱; 如果是 f_1, f_2, f_3, f_4 之外的

频率, 由于 G 函数的映射关系存在, 故不会对接收方的判断造成影响。

下面分析这种组网情况下的网间多址干扰概率, 并视频率相同时不造成干扰, 且只讨论相邻网受到干扰, 即每个网均受到一个邻网干扰的情况, 对于每个网均收到其它所有网干扰的复杂情况暂不予考虑。

设频率表 FRQ 中频率个数为 N , Q 为已组网的跳频网络数目, m 为扇出系数, 在 N 个频率中每个频率均可作出 m 个映射频率点。

设当前网由 G 函数映射出的下一跳频率为: $f_1, f_2, f_3, \dots, f_m$, 本网当前是由 f_0 跳到 f_1 , 而另一个网则跳到 $f_2, f_3, \dots, f_m$ 中的某一个频率, 则当前网受到另一个网的影响, 可能发生的干扰的概率为一个条件概率:

$P = P\{\text{另一个网跳到 } f_2, f_3, \dots, f_m \text{ 中的某一个} / \text{当前网由 } f_0 \text{ 跳到 } f_1, \text{ 且由 } G \text{ 函数映射出的其余跳频频率为: } f_2, f_3, \dots, f_m\}$ (3)

令: A 为另一个网跳到 $f_2, f_3, \dots, f_m$ 中某一个的事件, B 为当前网由 f_0 跳到 f_1 , 且由 G 函数映射出的其余跳频频率为 $f_2, f_3, \dots, f_m$ 的事件, 则有:

$$P = P(A/B) = P(AB)/P(B) \quad (4)$$

又因为 A, B 二者之间是相互独立的, 故 $P(AB) = P(A) \cdot P(B)$, 即有 $P = P(A)P(B)/P(B) = P(A)$, 所以由式(4)可得:

$$P = P(A) = \frac{C_{N-m+1}^{m-1} C_{m-1}^{m-1}}{C_N^m} * \frac{m-1}{m} + \frac{C_{N-m+1}^{m-2} C_{m-2}^{m-2}}{C_N^m} * \frac{m-2}{m} + \frac{C_{N-m+1}^{m-3} C_{m-3}^{m-3}}{C_N^m} * \frac{m-3}{m} + \dots + \frac{C_{N-m+1}^{m-1} C_{m-1}^{m-1}}{C_N^m} * \frac{1}{m}$$

$$= (m-1)/N \quad (5)$$

不发生网间多址干扰的概率为: $1-P$

Q 个网工作时不发生网间多址干扰的概率为: $(1-P)^{Q-1}$

Q 个网工作时发生网间多址干扰(每个网均受到一个邻网干扰的情况)的概率, 即差分跳频网间多址干扰模型为:

$$P_2 = 1 - (1-P)^{Q-1} \quad (6)$$

$$= 1 - [1 - (m-1)/N]^{Q-1} \quad (7)$$

由式(7)可画出 $N=64, 128, m=2, 4, Q$ 个网同时工作时的几种网间多址干扰概率曲线, 如图2所示。

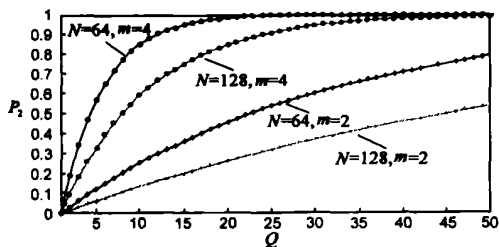


图2 几种网间多址干扰概率曲线图

由图2可见, m 一定时, N 越小, 其多址干扰概率越大; N 一定时, m 越大, 其多址干扰概率越大; 这与定性的理解也是吻合的。

以 $m=4, N=128$ 和 $N=64$ 为例, 得出不同数目的跳频网工作时, 网间多址干扰概率两组具体数据, 如表1、2所示:

表1 ($N=128$)

组网数 Q	2	5	8	12	16	18	20
网间多址干扰概率	0.0234	0.0905	0.1530	0.2296	0.2994	0.3318	0.3628

表2 ($N=64$)

组网数 Q	2	4	6	8	9	10	11
网间多址干扰概率	0.0469	0.1341	0.2134	0.2854	0.3189	0.3508	0.3813

从表1、表2可见, 由于异频干扰的存在, 当频率表数目为128、组网数为16时, 网间多址干扰概率达29.96%; 而当频率表数目为64、组网数为9时, 网间多址干扰概率达31.89%。

以上考虑的情况均为每个频点时序上完全重叠, 即最严重的网间多址干扰概率。

(b) 各异步网的频率表有部分频率相同

当频率表有频率交叠的现象如图3所示, 即每张频率表有 n 个频率, 能组 q 个网 ($q \geq 1$), 有 s 张频率表, 所有频率表共组 Q 个网 ($q = Q/s$), 各频率表之间重叠部分的频率数为 k , 则每张频率表两端各有 k 个频率可能落在相邻频率表的转移子集内 ($2k < n$), 那么, 其可能受多址干扰的概率为原来差分跳频网间多址干扰模型的 $2k/n$ 倍, 即网间最大多址干扰概率为:

$$P_3 = 1 - [1 - (m-1)/n]^{q-1} * (2k/n) \quad (8)$$

处于整个频段高端和低端的两张频率表各只有 k 个频率可能落在相邻频率表的转移子集内, 其可能受多址干扰的概率为原来差分跳频网间多址干扰模型的 k/n 倍, 即网间最大多址干扰概率为:

$$P_4 = 1 - [1 - (m-1)/n]^{q-1} * (k/n) \quad (9)$$

当 $k=0$ 时, 各异步网的频率表是相互独立的, 不存在网间多址干扰, 即网间多址干扰概率为0, 故公式仍然适用。

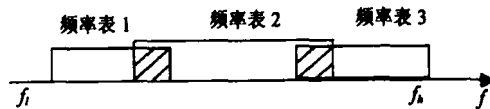


图3 多张频率表频率交叠示意图

4.3 异步组网效率分析

当频率表为 N 个时, 在网间多址干扰可以容忍的情况下, 组成 Q 个网, 组网效率的定义^[6]为:

$$\eta = Q/N \quad (10)$$

在这里只考虑差分跳频异步组网的效率, 以共用一张频率表为例, 由4.2节中差分跳频网间多址干扰模型式(7)得出:

$$Q = 1 + \frac{\lg(1-P_2)}{\lg[1-(m-1)/N]} \quad (11)$$

代入式(10)可得,

$$\eta = \frac{Q}{N} = \frac{1}{N} + \frac{\lg(1-P_2)}{N \lg[1-(m-1)/N]}$$

当 N 趋于无穷时,

$$\eta = -\ln 10 / [1 / (m - 1)] \lg(1 - P_2) = 2.3 [1 / (1 - m)] \lg(1 - P_2)$$

(12)

因此, 当 $N \gg 1$ 时, 有

$$\eta \approx [2.3 / (1 - m)] \lg(1 - P_2)$$

(13)

由式(13)可看出, 当跳频频率数 N 足够大时, 异步组网的效率由网间多址干扰概率和扇出系数 m 共同决定。分别画出 $m = 2, 4, 8$ 时, 差分跳频异步组网效率与网间最大多址干扰概率的关系曲线, 如图 4 所示。

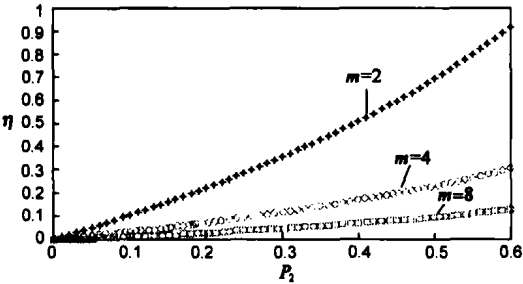


图 4 组网效率与网间多址干扰概率关系曲线图

由图 4, 可以看出 P_2, η 与 m 的关系, 分析如下:

(1) 当 m 一定时, 随着组网效率 η 上升, 网间多址干扰概率增加。也就是说组网效率的提高是以网间多址干扰概率的增加为代价的。

(2) 当 P_2 一定时, 随着 m 的增加, 组网效率 η 下降。也就是说, 随着 G 函数中扇出系数 m 的增加, 转移频率集增大, 在各网占用的频率资源一定的情况下, 网间多址干扰概率增加; 但在网间多址干扰概率一定的情况下, 由图 2 可知, 随着 m 的增加将会使组网数减少, 从而导致了组网效率的下降。

以 $m = 2, 4$ 为例, 得出网间多址干扰概率与组网效率的两组具体数据, 如表 3、4 所示:

表 3 ($m = 2$)

P_2	0.1	0.2	0.3	0.35	0.4	0.5
η	0.104	0.223	0.356	0.430	0.511	0.692

表 4 ($m = 4$)

P_2	0.1	0.2	0.3	0.35	0.4	0.5
η	0.035	0.074	0.119	0.143	0.170	0.231

可见, 如果用一张频率表组差分异步跳频网, 当网间多址干扰概率达 30% 左右时, 组网效率为 12% 数量级。

5 结束语

本文首次讨论了差分跳频组网参数、组网方式及其性能等问题, 推导了差分跳频异步组网的网间最大多址干扰概率和组网效率的计算公式, 并进行了仿真计算, 得出了一些有益的结论, 这些将对差分跳频新体制进入实用化有一定的指导意义, 但差分跳频同步组网问题还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Agile. Robust radio offers speed and reliability [J]. Signal Magazine, 1995, 49(2): 53- 54.
[2] D L Herrick, P K Lee. CHESS: A new reliable high speed HF radio[A]. IEEE MIL COM' 96[C]. Mclean: IEEE Press, Oct

ber, 1996. 684- 690.

[3] D L Herrick, P K Lee. Correlated frequency hopping: An improved approach to HF spread spectrum communications[A]. Proceedings of the 1996 Tactical Communications Conference [C]. Fort Wayn: IEEE Press, 1996. 320- 324.
[4] 姚富强, 刘忠英. 短波高速跳频 CHESS 电台 G 函数算法研究[J]. 电子学报, 2001, 29(5): 664- 667.
Yao Fu qiang, Liu Zhong ying. The study of G function arithmetic of a HF high speed FH CHESS radio[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(5): 664- 667. (in Chinese)
[5] 姚富强. 军事通信抗干扰及网系应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2004. 4. 112- 134.
[6] 王清泉, 姚富强. 战术跳频电台的组网运用及性能分析[J]. 通信技术与发展, 1993, (6): 39- 48.
[7] CHESS——一种新型可靠的高速短波电台[J]. 外军电信动态, 1997, (4): 33- 38.
[8] 高速可靠的高频增强型相关跳频电台[J]. 外军电信动态, 1995, (6): 12- 13.
[9] 潘武, 周世东, 姚彦. 差分跳频通信系统性能分析[J]. 电子学报, 1999, 27(11A): 102- 104.
PAN Wu, ZHOU Shi dong, YAO Yan. Performance analysis of differential frequency hopping communication system[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(11A): 102- 104. (in Chinese)
[10] 李少谦, 董彬虹. 短波高速模块研究[J]. 现代军事通信, 2000, (2): 15- 17.

作者简介:



赵丽屏 女, 1976 年出生, 硕士, 现为总参第 63 研究所工程师, 主要从事军事通信抗干扰研究工作. E-mail: zhaoliping63@hotmail.com



姚富强 男, 1957 年出生, 现为总参第 63 研究所研究员、博士/硕士生导师、中国电子学会会士. 主要从事军事通信抗干扰技术和体制研究。



李永贵 男, 1963 年出生, 硕士, 现为总参第 63 研究所高级工程师, 主要从事通信抗干扰技术和体制研究。