



研究与开发

用于电力物联网随机接入的低碰撞跳频通信系统

杜书¹, 马玫¹, 赵波¹, 曾琦², 刘星²

(1. 国网四川省电力公司信息通信公司, 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 通信网络是电力物联网数据采集和信息传输的必要组成部分。为了适应未来多种电力业务爆发式发展, 接入灵活和扩展性强的无线通信技术是电力物联网发展方向之一。面向电力物联网节点大规模接入、接入时刻随机、信息传输安全可靠等特点, 提出一种随机接入下具有低碰撞概率的电力跳频通信方式, 采用移位跳频序列组合方法给出了该跳频图案的产生方法。并通过理论计算和仿真给出了这类跳频序列特性和电力跳频通信系统传输误码率性能。通过分析验证了所提新型低碰撞跳频序列及其通信系统可以满足电力物联网大规模接入、高可靠通信需求, 具有较好的应用前景。

关键词: 电力物联网; 跳频通信系统; 低碰撞; 跳频序列; 误码率

中图分类号: TM727.2

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023018

Low-hit frequency-hopping communication systems for power Internet of things random access

DU Shu¹, MA Mei¹, ZHAO Bo¹, ZENG Qi², LIU Xing²

1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Information Communication Company, Chengdu 610041, China

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

Abstract: The communication network is an essential component of the data acquisition and information transmission in power Internet of things (IoT). To meet the development requirements of multiple power service in the future, the wireless communication technique with flexible-access and high scalability is one of the development directions for power IoT. Due to the features of large-scale access, random access time, high security and reliability for information transmission of power IoT, a frequency-hopping (FH) technique with low-hit rate for random access was proposed. The construction algorithm of such FH pattern was based upon the combination and shift operation of conventional FH sequences. By the theoretical arithmetic and numerical simulation, the properties of the proposed FH pattern and the error-rate of the FH-based power IoT were evaluated. The analysis reveals that the new class of FH sequences and the system can meet the requirements of large-scale access and highly reliable communication for the

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2023-01-10

通信作者: 曾琦, qzeng1@hotmail.com

基金项目: 国网四川省电力有限公司科技项目“泛在电力物联网感知层终端接入网研究”(No. 52194719003K)

Foundation Item: The Science and Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Co., Ltd. “Research on Terminal Access Networks in Sensing Layer of Ubiquitous Power Internet of Things” (No. 52194719003K)



power IoT, which has good application prospects.

Key words: power Internet of things, frequency-hopping communication system, low bit error rate, frequency-hopping sequence, BER

0 引言

随着能源互联网和智能电网的不断发展,更多的电力业务终端(如配电自动化终端、用电业务终端、精准负荷控制终端、输电监控终端、充电桩终端等)会接入电力物联网通信网络。这种通信网络具有以下特点:电力业务节点众多(大规模接入)、终端接入时刻随机(随机接入)、信息传输安全可靠。如何设计和采用安全可靠的通信技术是实现电力物联网通信网络的重要问题。在传统无线通信中,跳频技术作为一种最优的安全通信方式,已经广泛应用于多种关键通信场景(如战术通信、多层异构网络等^[1-2])。已有研究也考虑将跳频/扩频技术引入电力场景中(如电力线载波等),实现多种电力终端信息复用、终端与电力主站的双向通信^[3-6]。本文考虑的电力多业务接入跳频(frequency-hopping, FH)通信网络架构如图 1 所示。在电力主站范围内,大量业务节点通过跳频技术接入网络,这些节点接入时间是随机的。由于无线信道的开放性,不

同业务间可能存在相互干扰和恶意干扰。

跳频技术的研究始于 20 世纪 60 年代,第一部跳频电台问世于 20 世纪 70 年代末^[7],此后关于跳频技术的研究源源不断。1981 年,王永澄^[8]研究了基于 Reed-Solomon 码的跳频图案的性能,分析了其自相关和互相关特性以及保密特性。1983 年,陈文德^[9]研究了宽间隔的跳频图案,开辟了跳频图案宽间隔特性的新研究方向。1996 年,梅文华^[10]提出了跳频通信的地址编码理论,包括其理论限制和对应的构造。同年,葛造坤等^[11]对快速跳频电台的同步性能进行了研究,提出了一种实时搜索最佳同步频率的同步方案。1999 年,潘武等^[12]对差分跳频性能进行了理论分析,并且针对差分跳频的特点,提出了频率序列检测的方法。2007 年,陈亚丁等^[13]搭建了超高速跳频通信系统实验平台并对其抗干扰性能进行了研究,利用该实验平台分析了超高速跳频通信抗干扰性能的提升。跳频信号的中心频率随着给定的跳频图案(跳频序列)随机跳变,这种通信方式可从频域有效地避开恶意干扰信号,实现恶意干扰消除;

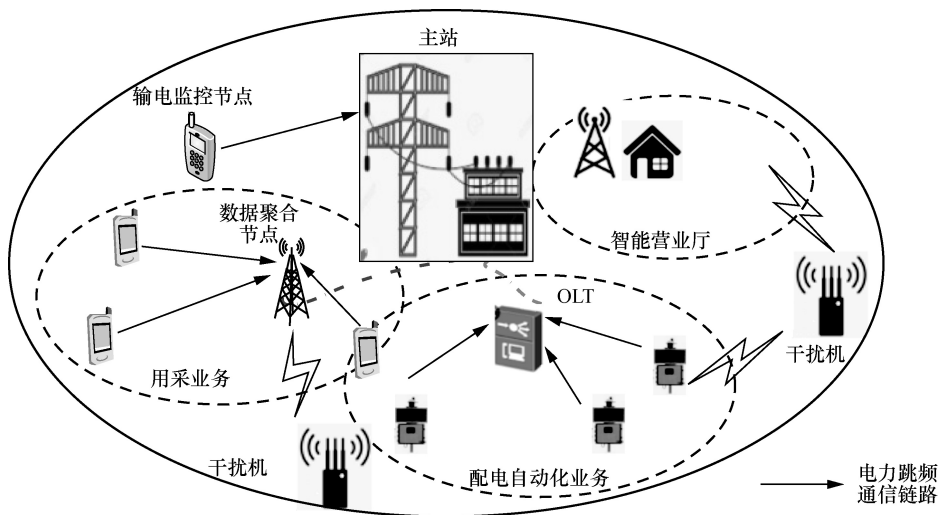


图 1 电力多业务接入跳频通信网络架构

同时,若一个数据符号通过多跳发送(快跳频方式),可进一步利用频率分集降低多径衰落和恶意干扰的影响^[7]。另外,通过优化设计跳频序列集合能有效控制频点碰撞概率,避免多节点之间的互干扰,提供较优的多址接入能力。由此可以看出,跳频图案是跳频技术的核心,决定了跳频通信系统的抵抗恶意干扰和多址接入能力。

目前,已有的跳频序列(图案)均以频点满足伪随机特性为主要目的,如素数跳频序列、宽间隔跳频序列、基于 Reed-Solomon 码的跳频序列等^[7]。在这类伪随机跳频序列中,各频点出现位置和次数均呈现均匀分布特性,可实现恶意干扰和跳频网络内互干扰均匀化,使得每个用户节点都能获得较好的传输性能。也正是由于频点的均匀性,传统伪随机跳频在任意时延接入下频点的碰撞概率都基本一致^[7]。传统跳频序列个数和频点碰撞概率完全受频隙集合大小限制,无法实现大规模节点接入;其次,在任意时延下传统跳频序列的频点碰撞较大,不利于电力通信高可靠性传输需求^[14-15]。在电力物联网场景下,希望采用的跳频序列具有如下特点:跳频序列条数多(满足大量节点接入),跳频频点随机性好(减小恶意干扰),在任意时延下,跳频序列的汉明相关值小(减小用户互干扰)。但是目前的最优伪随机跳频序列无法完全满足上述需求。

针对电力物联网通信特点,本文提出一种基于新型低碰撞区(low-hit-zone, LHZ)跳频序列的电力跳频通信网络。基于常规伪随机跳频序列集,跳频图案的产生采用移位跳频序列组合的方法。与传统跳频序列相比,这种 LHZ 跳频序列可提供两级的汉明相关值:在较小接入时延下, LHZ 跳频序列的汉明相关值尽可能小;在大时延下,这种 LHZ 跳频序列的汉明相关值虽略有增加但仍小于传统跳频序列^[16-17]。由此,新型 LHZ 跳频序列可实现随机接入下的低碰撞概率。与类似的无碰撞区(no-hit-zone, NHZ)跳频序列相比,在相同频隙个数条件下,新型 LHZ 跳频序列的序列条数更多,更适合大规模电力业务终端接入。以频移键控(frequency shift keying, FSK)调制异步跳频码分多址系统的上行链路为例,采用跳频技术的业务终端到主站的通信收发模型如图2所示,验证了采用新型 LHZ 跳频序列的电力物联网通信系统的传输性能。研究表明,基于 LHZ 跳频序列的跳频通信体制可为电力物联网提供大规模节点安全接入。

1 跳频序列的相关定义及电力 LHZ 跳频序列的需求

首先介绍与跳频序列设计相关的重要概念:汉明相关函数以及 LHZ 跳频序列。

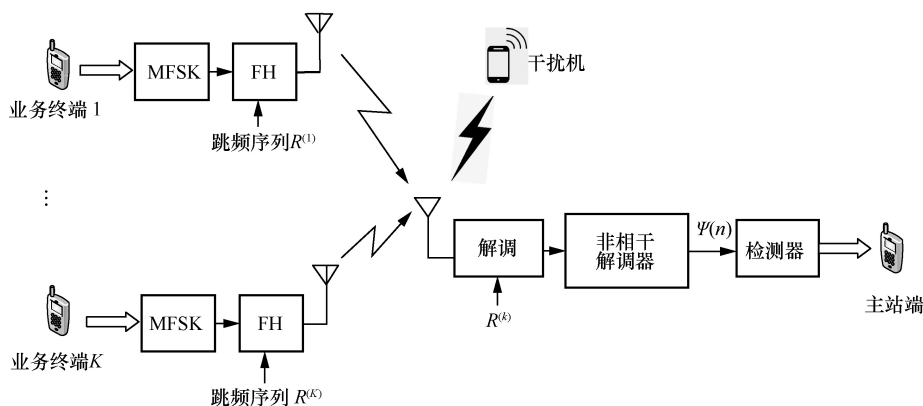


图2 采用跳频技术的业务终端到主站的通信收发模型



设 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$ 为大小为 q 的频隙集, 令 $S = \{S^1, S^2, \dots, S^M\}$ 为频隙集 F 上序列数目和长度分别为 M 和 L 的序列集, 其中 $S^i = (s_0^i, s_1^i, \dots, s_{L-1}^i)$, 定义 $h(a, b) = 1$ 当且仅当 $a = b$, 频点 a 和 b 碰撞; 否则 $h(a, b) = 0$, 这两个频点不碰撞。则汉明相关函数定义为:

$$H(S^i, S^j; T) = \sum_{k=0}^{L-1} h(s_k^i, s_{k+T}^j) \quad (1)$$

其中, $S^i, S^j \in S$, $T \left(0 \leq T \leq \frac{(q^n - 1)}{l - 1} \right)$ 为相对时

延, 且符号下标是在模 L 下运算的。由式 (1) 可知, 汉明相关函数 $H(S^i, S^j; T)$ 描述了以下情况: 当接入时延为 T 时, 在一个完整周期内, 两条跳频序列之间 (或序列与本身移位序列之间) 频点碰撞次数总和。汉明相关函数是跳频序列的关键指标, 它决定了跳频系统的抑制干扰能力和均匀性。

对于跳频序列集 S , 其最大汉明自相关、最大汉明互相关和最大汉明相关分别定义为^[14]:

$$\begin{aligned} H_a &= \{H(S^i, S^i; T) | S^i \in S, 0 < T \leq L-1\} \\ H_c &= \{H(S^i, S^j; T) | S^i, S^j \in S, i \neq j, 0 \leq T \leq L-1\} \\ H_m &= \max\{H_a, H_c\} \end{aligned} \quad (2)$$

对于跳频序列集 S , 令 $H_a(S)$ 和 $H_c(S)$ 为两个给定的非负整数, 定义汉明自相关低碰撞区大小 L_{AHZ} 、汉明互相关低碰撞区大小 L_{CHZ} 、低碰撞区大小 L_{HZ} 分别为:

$$\begin{aligned} L_{AHZ} &= \max\{T | H(S^i, S^i; T) \leq H_a(S), S^i \in S, 0 < T \leq L-1\} \\ L_{CHZ} &= \max\{T | H(S^i, S^j; T) \leq H_c(S), S^i, S^j \in S, i \neq j, 0 \leq T \leq L-1\} \\ L_{HZ} &= \min\{L_{AHZ}, L_{CHZ}\} \end{aligned} \quad (3)$$

称满足式 (3) 的跳频序列集 S 为 LHZ 跳频序列集。

对于 LHZ 跳频序列集 S , 令任意正整数 Z , $0 \leq Z \leq L_{HZ}$, 其低碰撞区外的最大汉明自相关、最大汉明互相关和最大汉明相关分别定义为:

$$\begin{aligned} H'_a &= \{H(S^i, S^i; T) | S^i \in S, Z < T \leq L-1\} \\ H'_c &= \{H(S^i, S^j; T) | S^i, S^j \in S, i \neq j, Z < T \leq L-1\} \\ H'_m &= \max\{H'_a, H'_c\} \end{aligned} \quad (4)$$

基于以上给出的 LHZ 跳频序列及汉明相关函数定义, 下面介绍适合电力物联网通信场景的跳频序列需求。设计的跳频序列应具有如下特点: 跳频序列条数多 (满足大量节点接入)、跳频频点随机性好 (减小恶意干扰)、在任意时延下跳频序列的汉明相关值小 (减小用户互干扰)。

目前在分布式网络管理方面的研究如下。

- 跳频频隙集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_q\}$ 中的所有频率被每条跳频序列均匀使用。即每个频点在序列中的出现位置基本随机, 出现次数基本相同, 以保证通信抗恶意干扰能力。
- 新构造的跳频序列集 S 中, 在准同步接入时, 任意两条跳频序列汉明互相关值小 (频率互碰撞的次数很小)。在异步随机接入时, 汉明互相关值的范围可略微放宽但仍应尽量小, 以有效消除电力业务节点互干扰。
- 在相同的频点个数 q , 新构造的跳频序列集 S 中的序列数目比传统最优伪随机跳频序列的个数成倍增加, 使得跳频系统能容纳更多的电力业务节点接入。
- 在相同新构造的跳频序列集 S 中, 任意跳频序列的汉明自相关值 (序列与其平移序列的频点碰撞次数) 尽可能少。

2 一种电力跳频 LHZ 序列设计方法

本文利用常规伪随机跳频序列集, 采用移位跳频序列组合方法生成一类 LHZ 跳频图案。这类 LHZ 跳频序列满足第 1 节描述的电力跳频通信需求。详细的构造算法主要分为 3 步。

步骤 1 选取 F_q 上的传统伪随机跳频序列集:

$$S = \{S^0, S^1, \dots, S^{M-1}\} \quad (5)$$

其中, $S^i = (s_0^i, s_1^i, \dots, s_{L-1}^i)$, $0 \leq i \leq M-1$, 其最大汉明相关值为 H_m 。这样的传统跳频序列集 S 可以

从已有的研究论文中得到^[7,14-15]。

步骤2 令 e, f 为正整数, 满足 $ef = L$, 定义移位序列 $E = (0, e, 2e, \dots, (f-1)e)$ 。生成移位跳频序列:

$$S^i(ke) = (s_{ke}^i, s_{ke+1}^i, \dots, s_{ke+L-1}^i), \quad (6)$$

$$0 \leq i \leq M-1, 0 \leq k \leq f-1$$

步骤3 构造跳频序列集 $R = \{R^0, R^1, \dots, R^{M-1}\}$, 其中:

$$R^i = (r_0^i, r_1^i, \dots, r_{fL-1}^i), 0 \leq i \leq M-1 \quad (7)$$

且:

$$r_j^i = s_{\langle j \rangle_f e + \lfloor \frac{j}{f} \rfloor}^i, 0 \leq j \leq fL-1 \quad (8)$$

基于上述构造方法得到的跳频序列集 R 具有以下性质。

定理 跳频序列集 R 为 LHZ 跳频序列集, 其序列长度为 fL , LHZ 跳频序列大小为 $Z = e-1$ 。

当相对时延在 LHZ 跳频序列内 ($T \leq Z$) 时, R 的最大汉明相关为 fH_m ; 当相对时延大于 LHZ 跳频序列时 ($T > Z$), 最大汉明相关为 $(f-1)H_m + L$ 。

证明 由于传统跳频序列集 S 的最大汉明相关值为 H_m , 根据交织技术理论^[18-19]和构造算法(如式(5)~式(8)), 易得构造序列集 R 是 LHZ 跳频序列集, 其 LHZ 大小为 $Z = e-1$, 当 $T \leq Z$ 内的最大汉明相关为 fH_m 。而相对时延大于 LHZ 跳频序列时的最大汉明相关需要进一步证明。在相对时延 $T \geq e$ 时, 其 $R^i, R^j \in R$ 的汉明相关函数为:

$$H(R^i, R^j; T) = \sum_{n=0}^{fL-1} h(r_{\langle n \rangle_f}^i, r_{\langle n+T \rangle_f}^j) = \sum_{n=0}^{fL-1} h\left(s_{\langle n \rangle_f e + \lfloor \frac{n}{f} \rfloor}^i, s_{\langle n+T \rangle_f e + \lfloor \frac{n+T}{f} \rfloor}^j\right) = \sum_{n_1=0}^{f-1} \sum_{n_2=0}^{L-1} h\left(s_{\langle n_1 L + n_2 \rangle_f e + \lfloor \frac{n_1 L + n_2}{f} \rfloor}^i, s_{\langle n_1 L + n_2 + T \rangle_f e + \lfloor \frac{n_1 L + n_2 + T}{f} \rfloor}^j\right) \quad (9)$$

情况1 当 $i = j$ 时。因为 $ef = L$, 在相对时延

满足 $T \geq e$, 即 $T \geq \frac{L}{f}$ 时, 如果要使

$$\langle n \rangle_f e + \left\lfloor \frac{n}{f} \right\rfloor = \langle n+T \rangle_f e + \left\lfloor \frac{n+T}{f} \right\rfloor, \text{ 则 } \left\lfloor \frac{n}{f} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{n+T}{f} \right\rfloor = (\langle T \rangle_f - f)e。$$

由此可求得存在唯一正整数 $n_1 = a$, $0 \leq a \leq f-1$, 使得 n_2 取满足 $0 \leq n_2 \leq L-1$ 的任意值时, 都有 $\left\lfloor \frac{n}{f} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{n+T}{f} \right\rfloor = (\langle T \rangle_f - f)e$ 。这样

$R^i, R^j \in R$ 的汉明相关函数为:

$$H(R^i, R^j; T) = \sum_{n_2=0}^{L-1} h\left(s_{\langle aL+n_2 \rangle_f e + \lfloor \frac{aL+n_2}{f} \rfloor}^i, s_{\langle aL+n_2+T \rangle_f e + \lfloor \frac{aL+n_2+T}{f} \rfloor}^j\right) + \sum_{n_1=0, n_1 \neq a}^{f-1} \sum_{n_2=0}^{L-1} h\left(s_{\langle n_1 L + n_2 \rangle_f e + \lfloor \frac{n_1 L + n_2}{f} \rfloor}^i, s_{\langle n_1 L + n_2 + T \rangle_f e + \lfloor \frac{n_1 L + n_2 + T}{f} \rfloor}^j\right) \leq L + \sum_{n_1=0, n_1 \neq a}^{f-1} H_m = L + (f-1)H_m \quad (10)$$

情况2 当 $i \neq j$ 时。 $R^i, R^j \in R$ 的汉明相关函数为:

$$H(R^i, R^j; T) \leq \sum_{n_1=0}^{f-1} H_m = fH_m \quad (11)$$

综上所述, 在 LHZ 外的最大汉明相关为 $(f-1)H_m + L$ 。

证毕。

3 序列实例与比较

本节按照上述的序列构造方法, 给出一个适合电力物联网随机接入的 LHZ 跳频序列实例, 给出其汉明相关特性, 并和已有的传统跳频序列进行比较。

例如, 当 $q = 14$ 、 $L = 14$ 、 $M = 12$ 时, 基序列集 $S = \{S^0, S^1, S^2, \dots, S^{11}\}$, 其中:



$$\begin{aligned}
S^0 &= (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13) \\
S^1 &= (0,2,4,6,8,10,12,1,3,5,7,9,11,13) \\
S^2 &= (0,3,6,9,12,2,5,8,11,1,4,7,10,13) \\
S^3 &= (0,4,8,12,3,7,11,2,6,10,1,5,9,13) \\
S^4 &= (0,5,10,2,7,12,4,9,1,6,11,3,8,13) \\
S^5 &= (0,6,12,5,11,4,10,3,9,2,8,1,7,13) \\
S^6 &= (0,7,1,8,2,9,3,10,4,11,5,12,6,13) \\
S^7 &= (0,8,3,11,6,1,9,4,12,7,2,10,5,13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S^8 &= (0,9,5,1,10,6,2,11,7,3,12,8,4,13) \\
S^9 &= (0,10,7,4,1,11,8,5,2,12,9,6,3,13) \\
S^{10} &= (0,11,9,7,5,3,1,12,10,8,6,4,2,13) \\
S^{11} &= (0,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,13) \quad (12)
\end{aligned}$$

容易验证, 序列集 S 为最大汉明相关 $H_m = 2$ 的跳频序列集, 令 $e = 7$ 、 $f = 2$, 则可以得到跳频序列集 $R = \{R^0, R^1, R^2, \dots, R^{11}\}$, 其中:

$$\begin{aligned}
R^0 &= (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,0,2,4,6,8,10,12,1,3,5,7,9,11,13) \\
R^1 &= (0,2,4,6,8,10,12,1,3,5,7,9,11,13,0,3,6,9,12,2,5,8,11,1,4,7,10,13) \\
R^2 &= (0,3,6,9,12,2,5,8,11,1,4,7,10,13,0,4,8,12,3,7,11,2,6,10,1,5,9,13) \\
R^3 &= (0,4,8,12,3,7,11,2,6,10,1,5,9,13,0,5,10,2,7,12,4,9,1,6,11,3,8,13) \\
R^4 &= (0,5,10,2,7,12,4,9,1,6,11,3,8,13,0,6,12,5,11,4,10,3,9,2,8,1,7,13) \\
R^5 &= (0,6,12,5,11,4,10,3,9,2,8,1,7,13,0,7,1,8,2,9,3,10,4,11,5,12,6,13) \\
R^6 &= (0,7,1,8,2,9,3,10,4,11,5,12,6,13,0,8,3,11,6,1,9,4,12,7,2,10,5,13) \\
R^7 &= (0,8,3,11,6,1,9,4,12,7,2,10,5,13,0,9,5,1,10,6,2,11,7,3,12,8,4,13) \\
R^8 &= (0,9,5,1,10,6,2,11,7,3,12,8,4,13,0,10,7,4,1,11,8,5,2,12,9,6,3,13) \\
R^9 &= (0,10,7,4,1,11,8,5,2,12,9,6,3,13,0,11,9,7,5,3,1,12,10,8,6,4,2,13) \\
R^{10} &= (0,11,9,7,5,3,1,12,10,8,6,4,2,13,0,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,13) \\
R^{11} &= (0,12,11,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,13,0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13) \quad (13)
\end{aligned}$$

下面将本文提出的跳频序列与无碰撞区跳频序列性能比较^[20]。如果构造同样参数的 NHZ 跳频序列集, 即频隙集大小 q 、序列长度 L 、NHZ 大小 Z 相同的情况下, 根据 Ye-Fan 界^[20]有:

$$M \leq \frac{q}{Z+1} = \frac{14}{6+1} = 2 \quad (14)$$

即在频隙集大小 q 、序列长度 L 、NHZ 大小 Z 相同的情况下, NHZ 跳频序列集最多只有 2 条序列。本文构造的 LHZ 跳频序列集与 NHZ 跳频序列集参数比较见表 1。

4 基于低碰撞序列的电力跳频通信的传输性能

本节将跳频技术及构造的 LHZ 跳频序列应用于电力物联网多业务终端通信网, 并采用 MATLAB 仿真软件研究该电力物联网通信系统的传输性能 (以误码率为指标)。采用图 2 所示的通信收发模型, 在电力业务终端侧, 数据采用 FSK 调制后再送入跳频模块。跳频载波的中心频率跳频规律由本文设计的 LHZ 跳频序列控制,

表 1 本文构造的 LHZ 跳频序列集与 NHZ 跳频序列集参数比较

对比项	频隙集大小 q	序列长度 L	LHZ/NHZ 大小 Z	序列数目 M
LHZ 跳频序列集	14	28	6	12
NHZ 跳频序列集	14	28	6	2

且不同的业务终端使用跳频序列集 R 中不同的跳频序列, 从而实现跳频多址接入 (FH multi-access, FHMA)。为了方便分析, 本文考虑经典的 FSK 调制的跳频系统 (FSK/FH 系统), 假设一个 FSK 符号由一跳发送, 且相邻跳频频点间隙足够大, 能保证跳频信号间相互正交。在主机接收端, 接收到多个电力业务终端发来的信号依次进行解调、非相干解调和判决, 最终得到发送的数据^[7]。

采用低碰撞跳频序列的电力物联网 FSK/FH 通信系统性能如图 3 所示, 给出了随机接入时延下 ($T \leq L-1$), 基于低碰撞跳频序列的电力物联网 FSK/FH 通信系统误码率, 其中 K 为电力业务节点数, 系统调制方式采用 BFSK 和 8FSK。可以看出, 电力物联网跳频通信系统的误码率随着电力业务节点数 K 的增加而增加。这是因为随着终端节点数增加, 跳频序列之间的频点碰撞概率有所增加, 这会导致多址接入干扰 (multi-access interference, MAI) 增加。另外, 采用 8FSK 调制时的误码率优于 BFSK。当信噪比足够大时, 误码率会出现错误平台, 这个错误平台由 MAI 决定。

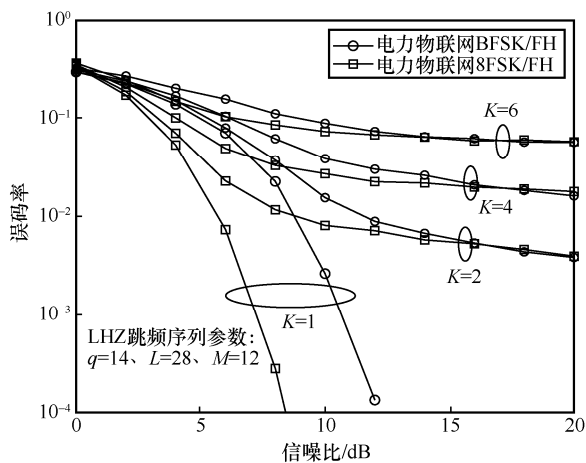


图3 采用低碰撞跳频序列的电力物联网 FSK/FH 通信系统性能

为了验证本文所提的低碰撞跳频序列是否符合电力物联网的业务指标需求, 这里选取某省的 12 类业务作为应用场景。根据该省提供的指

标数据, 整理得出的某省 12 类业务的可靠性需求见表 2。

表2 某省 12 类业务的可靠性需求

序号	业务名称	可靠性需求
1	配电自动化 (二遥)	$\geq 95\%$
2	配电自动化 (三遥)	$\geq 95\%$
3	用电信息采集	$\geq 90\%$
4	电动汽车充电桩	$\geq 99\%$
5	精准负荷控制	$\geq 99\%$
6	供电电压自动采集	$\geq 95\%$
7	输配变机器巡检	无人机 $\geq 95\%$ 机器人 $\geq 95\%$
8	智能营业厅	$\geq 90\%$
9	基建视频监控	$\geq 90\%$
10	仓储管理	$\geq 90\%$
11	综合能源	$\geq 90\%$
12	变电站一键顺控及运维班全面监视项目	$\geq 90\%$

从表 2 可以看出, 用电信息采集、智能营业厅、基建视频监控、仓储管理、综合能源、变电站一键顺控及运维班全面监视项目这 6 类业务的可靠性需求均大于或等于 90%, 即误码率应小于或等于 0.1, 于是选取跳频序列集中的 6 条序列对其进行信息传输。由图 3 可以看出, 在信噪比为 20 dB 时, 其业务节点数 $K=6$ 时的误码率小于 10^{-1} , 满足其可靠性需求。同时, 配电自动化 (二遥)、配电自动化 (三遥)、供电电压自动采集、输配变机器巡检这 4 类业务的可靠性需求大于或等于 95%, 即误码率应小于或等于 0.05, 则选取跳频序列集中的另外 4 条序列对其进行信息传输。由图 3 可看到, 在信噪比为 20 dB 时, 其业务节点数 $K=4$ 时的误码率介于 10^{-2} 和 10^{-1} 之间, 由图 3 可判断其值小于或等于 0.05, 则满足其可靠性需求。最后, 电动汽车充电桩和精准负荷控制的可靠性需求大于或等于 99%, 误码率应小于或等于 0.01, 于是选取跳频序列集中余下的 2 条序列对其进行信息传输。由图 3 可看到, 在信噪比



为 20 dB 时, 其业务节点数 $K=2$ 时的误码率小于 10^{-2} , 满足其可靠性需求。则采用该低碰撞跳频序列可使得所有的电力业务满足可靠性需求, 即本文所提低碰撞跳频序列是可行的。

5 结束语

针对电力物联网通信系统中大规模终端随机接入、高可靠安全传输的需求, 本文提出采用跳频技术的电力物联网通信体制; 利用循环移位和组合方法设计了一类新型的低碰撞跳频序列集。通过理论分析证明了, 这类跳频序列在随机接入下具有较低的频点碰撞概率; 且在相同参数下, 序列条数比其他类似的无碰撞区跳频序列条数更多, 更适合电力物联网的通信需求。最后通过仿真验证了这类低碰撞跳频序列在电力跳频通信系统中的传输性能。通过上述分析可知, 所提低碰撞跳频序列及其通信系统可以满足电力物联网通信需求, 具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] TORRIERI D, TALARICO S, VALENTI M C. Analysis of a frequency-hopping millimeter-wave cellular uplink[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 7089-7098.
- [2] 吕娜. 数据链理论与系统(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
LYU N. Theory and system of data link[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2018.
- [3] ZENG Q, LI H, PENG D. Frequency-hopping based communication network with multi-level QoS in smart grid: code design and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1841-1852.
- [4] 赵训威, 白杰, 丁高泉, 等. 230 MHz 电力无线通信技术的优化[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 158-164.
ZHAO X W, BAI J, DING G Q, et al. Optimization of electric power wireless communication technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 158-164.
- [5] 张小建, 费穆轩, 姜海涛, 等. 电力 5G 混合组网的安全风险分析[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 132-139.
ZHANG X J, FEI J X, JIANG H T, et al. Security risk analysis of power 5G hybrid networking[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 132-139.
- [6] MALANDRA F, SANSÒ B. A Markov-modulated end-to-end delay analysis of large-scale RF mesh networks with time-slotted ALOHA and FHSS for smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(11): 7116-7127.
- [7] 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.
MEI W H, WANG S B, QIU Y H, et al. Frequency hopping communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [8] 王永澄. 采用 Reed-Solomon 码的跳频图样[J]. 南京航空航天大学学报, 1981, 13(3): 39-49.
WANG Y C. Frequency hopping pattern from Reed-Solomon codes[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1981, 13(3): 39-49.
- [9] 陈文德. 宽间隔的跳频图样[J]. 系统科学与数学, 1983, 3(4): 295-303.
CHEN W D. Frequency hopping patterns with wide intervals[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1983, 3(4): 295-303.
- [10] 梅文华, 杨义先. 跳频通信地址编码理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
MEI W H, YANG Y X. Coding for the frequency hopping communication[J]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.
- [11] 葛造坤, 李少谦. 快速跳频电台同步系统性能分析[J]. 电子科技大学学报, 1996, 25(S3): 334-338.
GE Z K, LI S Q. Analysis of the performance for the high FH synchronization[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1996, 25(S3): 334-338.
- [12] 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(S1): 102-104.
PAN W, ZHOU S D, YAO Y. Performance analysis of differential frequency hopping communication system[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(S1): 102-104.
- [13] 陈亚丁, 刘晓晖, 程郁凡, 等. 超高速跳频通信系统的实现及抗干扰性能[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2191-2194.
CHEN Y D, LIU X H, CHENG Y F, et al. The architecture and anti-jamming test of ultra-fast frequency hop platform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(9): 2191-2194.
- [14] PENG D Y, FAN P Z. Lower bounds on the Hamming auto- and cross correlations of frequency-hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(9): 2149-2154.
- [15] DING C, FUJIHARA R, FUJIWARA Y, et al. Sets of frequency hopping sequences: bounds and optimal constructions[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3297-3304.
- [16] ZHOU L, LIU X. Families of optimal low-hit-zone frequency-hopping sequence sets under the periodic partial Hamming correlation properties[J]. IEEE Access, 2020(8): 14991-14998.
- [17] LING L, NIU X H, ZENG B S, et al. New classes of optimal low hit zone frequency hopping sequence set with large family size[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2018, E101-A(12): 2213-2216.
- [18] NIU X H, HAN L, LIU X. New extension interleaved constructions of optimal frequency hopping sequence sets with low hit

- zone[J]. IEEE Access, 2019(7): 73870-73879.
- [19] GONG G. New designs for signal sets with low cross correlation, balance property and large linear span: GF(p) case[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(11): 2847-2867.
- [20] YE W X, FAN P Z, GABIDULIN E. Construction of non-repeating frequency-hopping sequences with no-hit zone[J]. Electronics Letters, 2006, 42(12): 681-682.

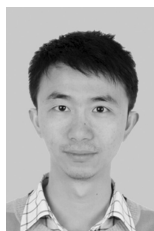
[作者简介]



杜书 (1983-), 男, 博士, 国网四川省电力公司信息通信公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信技术应用。



赵波 (1987-), 男, 国网四川省电力公司信息通信公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信运行。



曾琦 (1982-), 男, 博士, 四川大学电气工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为能源互联网信息技术、电力物联网。



马玫 (1982-), 女, 国网四川省电力公司信息通信公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信。



刘星 (1986-), 男, 博士, 四川大学电气工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为电力通信技术与信息理论。