

适用于配电网节点接入的灾备跳频通信系统

龙呈^{1,2}, 张剑³, 张华¹, 刘星⁴, 高艺文¹, 苏学能¹, 李世龙¹, 杨勇波¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 4. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:在自然灾害、恶意攻击或意外故障等不可预见的情况下, 配电网往往会受其影响导致节点通信发生故障, 因此具有容灾备份的通信网络必不可少。为了保障灾害条件下配电网节点的顺利通信, 提出了一种适用于灾害条件下的跳频通信系统, 该系统采用两级跳频系统结合的方式来保证配电网节点通信网络接入的可靠性; 然后, 采用迹函数的方法设计了满足该系统的两级跳频序列族, 并验证了该跳频序列族的两级汉明相关特性, 主用跳频序列族的汉明相关特性满足理想的汉明相关值特性, 而备用序列族的汉明相关特性虽然稍高于主用跳频序列族的相关特性, 但是仍然能够达到一个很低的值; 最后, 将主备用跳频序列族用于信道传输中进行仿真分析。结果表明, 该序列族的误码率特性优于传统的低碰撞跳频序列族。通过分析可知, 该新型跳频通信系统适用于灾害条件下的配电网节点接入, 能够保障信息传输的可靠性。

关键词:配电网; 灾备通信; 跳频通信; 跳频序列

中图分类号: TM 752 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)06-0068-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240610

Frequency Hopping Communication Systems for Access of Distribution Network Nodes Under Disaster Recovery

LONG Cheng^{1,2}, ZHANG Jian³, ZHANG Hua¹, LIU Xing⁴, GAO Yiwen¹,
SU Xueneng¹, LI Shilong¹, YANG Yongbo¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In unforeseeable situations such as natural disasters, malicious attacks or unexpected failures, distribution networks are often affected by these disasters, leading to communication failures at their node, so a communication network with disaster recovery backup is essential. In order to ensure the smooth communication of distribution network nodes under disaster conditions, a frequency hopping communication system suitable for disaster conditions is proposed. This system adopts a combination of two-level frequency hopping systems to ensure the reliability of communication network access for distribution network nodes. Then, a two-level hopping sequence set that satisfies the system is designed using the trace function method, and the two-level Hamming correlation characteristics of frequency hopping sequence set are verified. The Hamming correlation characteristics of main frequency hopping sequence set satisfy the ideal Hamming correlation value characteristics, while the Hamming correlation characteristics of backup sequence set, although slightly higher than those of main frequency hopping sequence set, can still reach a very low value. Finally, the main and backup frequency hopping sequence sets are used for simulation analysis in channel transmission, and the results show that the characteristics of bit errors of this sequence set are superior to traditional low-hit-zone frequency hopping sequence sets. Through analysis, it can be concluded that the proposed frequency hopping communication system is suitable for the access of distribution network nodes under disaster conditions, and can ensure the reliability of information transmission.

Key words: distribution network; disaster recovery communication; frequency hopping communication; frequency hopping sequence

0 引 言

在配电网中,各类自然灾害、恶意攻击、意外故障等都是不可预见的,在这些灾害条件下,配电网往往会受到这些灾害的影响而发生故障。随着未来配电网终端数的爆发式增长,拥有大规模的节点是配电网发展的必然趋势。在这样的情况下,配电终端很难快速地切换并接入备份网络,大规模配电终端在容灾情况下的传输和接入机制是亟待解决的问题^[1]。在大规模配电终端节点网络中,数据传输和接入具有以下特点:1) 配电终端节点接入要求具有较短的响应时间,以满足用户的及时需求;2) 数据传输应避免相互干扰,以确保传输的可靠性;3) 终端数据传输应确保其安全性。

目前,配电终端网络现有的接入机制大多是传统的请求-响应机制。文献[2]基于用户停电损失评估建立了有源配电网的灾后供电恢复模型,利用多种分布式电源和储能系统快速响应并恢复重要负荷,从而提升配电网的韧性。文献[3]提出了一种灾后配电网维修恢复联合调度策略,从而实现网络节点的响应接入。文献[4]对某省电力负荷进行了预测,其网络接入方式也为请求-响应机制。由于配电网接入过程中存在网络拥塞、电磁干扰等因素,接入速度存在时延,无法实现瞬时接入,不能满足用户的及时需求。文献[5]从网络分层的角度分析了网络组件、拓扑结构、路由策略、网络管理和建设成本等因素对电力通信接入可靠性的影响。文献[6]根据电力系统通信业务的特点,利用同步数字系列(synchronous digital hierarchy, SDH)技术提高了电

力通信传输接入的性能。文献[7]提出了基于网格化的配电网灾后电力与通信协调恢复方法,根据移动基站与电力节点的对应关系划分配电网多级网格,以抢修时间短和停电损失小为目标实现快速接入。由此可见,灾害条件下需要电力网络的快速重新接入,除此之外,如果为不同的终端节点选择相同的时隙进行接入,则还可能发生时隙冲突,并且这种冲突会导致节点之间频繁地发生相互干扰。而目前避免时隙冲突的接入方式已有很多文献报道。文献[8]研究了静态负载模型下电力通信相依网络的保护策略和动态负载模型下考虑耦合关系影响的路由策略,从而实现了电力通信节点的时隙无冲突接入。文献[9]讨论了中国电力通信专网的发展现状以及现有网络接入的方式。文献[10]提出了采用拥塞规避算法处理数据拥堵问题,使得节点接入的数据流畅通,满足不同业务网络接入的需求,充分利用网络资源。文献[11]提出了一种链路稳定性的基于受限应用协议拥塞控制算法,通过强、弱和失败消息往返时间来确定网络环境状态并平滑估计超时重传时间,从而避免出现不必要的重传,减少了电力网络接入的开销。目前已有的接入方式中,每个终端选择的信道通常是固定的,即始终选取同一个频隙进行接入,其安全性无法得到保证。

传统的跳频通信系统可以实现信息的安全传输,并且可以使得各个用户充分利用频隙资源而不会发生相互之间的干扰,所以跳频通信系统在多址接入的场景下有着广泛的应用。图1为传统的跳频通信系统多址接入的结构示意图。传统的跳频通信系统考虑的是多个终端用户接入同一个网络的情况,所采用的跳频序列族为预先设定好的跳频序

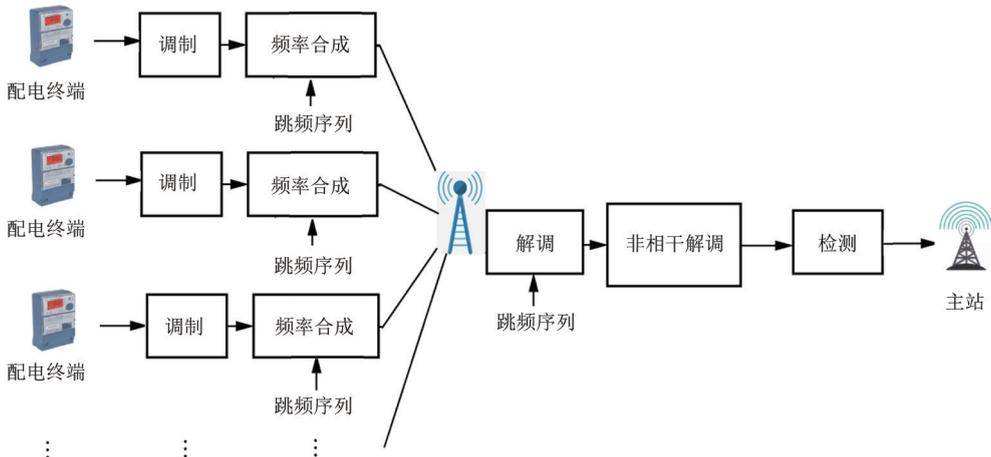


图1 传统跳频通信系统多址接入

列族。但是对于灾害发生时,并未考虑利用备用网络来对其进行通信恢复,所以传统的跳频通信系统并不适用于灾害条件下的配电网。因此,下面提出了一种新的适用于灾害情况下的配电终端接入网的两级跳频通信系统,并构造了一组新的两级跳频序列族对其进行载波频率编码。该两级跳频通信系统可以解决以下问题:1)主备用序列之间可以实现无缝切换而不会带来误码率的提升;2)由于跳频序列的伪随机性,可以保证信息的安全传输;3)序列具有低汉明相关特性,可确保任何用户之间没有干扰或干扰很低;4)频隙资源可以得到充分利用。

1 两级跳频系统

为了应对灾害条件下配电网节点的通信失效,下面设计一种两级跳频通信系统来对其进行备份接入。

跳频通信系统的关键是跳频序列,其作用是直接控制载波频率进行变化,从而达到频率随机变化的效果。跳频序列设计的好坏直接影响了跳频系统的可靠性和安全性等性能。

传统的跳频系统是每一个用户分配一条跳频序列,该用户根据分配的跳频序列选取对应的频隙进行接入,从而实现信息传输。设计两级跳频系统的关键是设计两级跳频序列族,即主备用跳频序列族,其关系原理如图 2 所示。

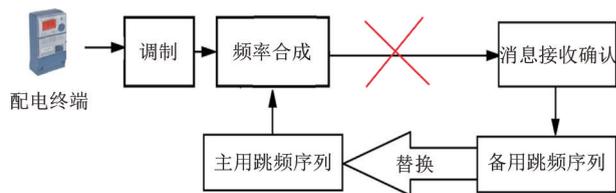


图 2 两级跳频系统关系原理

如图 2 所示,两级跳频系统由主用跳频序列和备用跳频序列构成。正常无灾害情况下,由主用跳频序列控制其频率合成,然后通过合成的载波频率发送消息即可完成信息传输过程。当灾害发生时,如果发送的消息失败,即传输通道发生故障,则此时选用备用通道进行信息传输。具体操作为:当消息接收端在规定时间内未接收到有用消息时,此时发送指令给备用网络,备用网络分配备用跳频序列以替换主用跳频序列,再利用备用跳频序列进行频率合成;然后,再通过新合成的载波频率进行信息传输,此时再进行消息接收确认。若收到,则表明配电终

端节点已实现新的网络的成功接入,否则选取新的备用跳频序列替代前一跳频序列继续上述步骤。由此可以看出,该两级跳频通信系统能否实现灾害条件下配电网节点的成功接入以及正常通信,关键在于设计一组具有优良特性的主备用跳频序列族,如果主备用跳频序列族具有理想的汉明相关特性以及随机特性,则该两级跳频通信系统能够实现灾害条件下配电网节点在主备用网络间的无缝切换与接入。

由此,两级跳频序列族应该满足以下要求:

- 1) 主用跳频序列族应该满足最佳汉明相关特性,以实现正常情况下的信息可靠性传输;
- 2) 备用跳频序列族应该满足与主用跳频序列族之间的汉明相关尽可能的小,以确保灾害条件下网络间的及时切换与信息可靠传输;
- 3) 主备用跳频序列族的序列数目要尽可能的多,以满足更多的用户数需求;
- 4) 主备用序列的周期要尽可能的长,以实现消息的大容量传输;
- 5) 主备用序列的随机性要尽可能的好,以保障信息传输的安全性;
- 6) 主备用跳频序列族的频隙尽可能分布均匀,以保障各个频隙的充分利用。

除此之外,还应该尽可能满足传统跳频序列所要求的性质,比如大线性复杂度、宽间隔特性等。设计具有这些优良特性的跳频序列族往往具有一定的难度,这些特性与参数相互之间是制约的关系,受到跳频序列理论界的约束。后面将详细介绍设计该跳频序列族的方法。

2 跳频序列族的设计

首先,给出相关的符号定义。

q :表示一个素数。

$G_F(q)$:表示包含 q 个元素的有限域^[12-13]。

$G_F(q^n)$:表示 $G_F(q)$ 的有限扩域,其中 n 为正整数。

α :表示 $G_F(q^n)$ 的一个生成元。

$t_r(x)$:从 $G_F(q^n)$ 到 $G_F(q)$ 的迹函数,即 $t_r(x) = x + x^q + x^{q^2} + \dots + x^{q^{n-1}}$ 。

$\langle x \rangle_n$:表示 x 模 n 的剩余。

$x|y$:表示 x 整除 y 。

$g_{cd}(x, y)$:表示 x 和 y 的最大公因子。

$|\{\cdot\}|$:表示集合 $\{\cdot\}$ 中元素的个数。

$[L, N, q]$:表示周期为 L 、数目为 N 且频隙集大小为 q 的跳频序列族。

$h(x, y)$:如果 $x = y$, 则 $h(x, y) = 1$; 如果 $x \neq y$, 则 $h(x, y) = 0$ 。

对于适用于配电网节点接入的两级跳频序列, 构造方式如下:

第一步:选取素数 q , 利用迹函数生成式(1)序列。

$$a = [t_r(\alpha^0), t_r(\alpha^1), \dots, t_r(\alpha^{q^n-2})] \quad (1)$$

第二步:构造具有参数 $\left[\frac{q^n-1}{N}, N, q\right]$ 的序列族 \mathbf{A} 。

$$\mathbf{A} = \{a^i \mid i = 0, 1, \dots, N-1\} \quad (2)$$

其中,

$$a^i = \left\{ t_r(\alpha^i), t_r(\alpha^{i+N}), \dots, t_r\left[\alpha^{i+\left(\frac{q^n-1}{N}-1\right)N}\right] \right\}$$

且 $N \mid (q^n-1)$ 和 $g_{cd}(N, \frac{q^n-1}{N}) = 1$ 。

第三步:构造具有参数 $\left[\frac{q^n-1}{N}, q-1, q\right]$ 的序列族 \mathbf{B} 。

$$\mathbf{B} = \{b^i \mid i = 1, 2, \dots, q-1\} \quad (3)$$

其中,

$$b^i = \left\{ t_r(\alpha^0) + i, t_r(\alpha^N) + i, \dots, t_r\left[\alpha^{\left(\frac{q^n-1}{N}-1\right)N}\right] + i \right\}$$

且以上加法运算是在 $G_F(q)$ 上进行的。

下面给出汉明相关函数的定义。

假设长度为 L 的序列 $a = (a_0, a_1, \dots, a_{L-1})$ 和 $b = (b_0, b_1, \dots, b_{L-1})$, 其在相对时延 l 下的汉明自相关函数和汉明互相关函数分别为:

$$H_a(l) = \sum_{i=0}^{L-1} h(a_i, a_{\langle i+l \rangle_L}) \quad (4)$$

$$H_{ab}(l) = \sum_{i=0}^{L-1} h(a_i, b_{\langle i+l \rangle_L}) \quad (5)$$

根据汉明相关函数的定义, 可得到以下结论:

定理1:由前述得到的序列族 \mathbf{A} 的汉明自相关旁瓣值(即相对时延不为0时)和汉明互相关不超过 $(q^{n-1}-1)/N$, 即序列族 \mathbf{A} 可用作主用跳频序列。

证明:由汉明相关的定义可知, 汉明自相关为

$$H_{a^i}(l) = \sum_{j=0}^{\frac{q^n-1}{N}-1} h\left\{ t_r(\alpha^{i+jN}), t_r[\alpha^{i+(j+l)N}] \right\} =$$

$$\begin{aligned} & \left| \left\{ j \mid t_r(\alpha^{i+jN}) = t_r[\alpha^{i+(j+l)N}], j = 0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1 \right\} \right| = \\ & \left| \left\{ j \mid t_r(\alpha^{i+jN}) - t_r[\alpha^{i+(j+l)N}] = 0, j = 0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1 \right\} \right| = \\ & \left| \left\{ j \mid t_r[\alpha^{i+jN}(1-\alpha^{lN})] = 0, j = 0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1 \right\} \right| \quad (6) \end{aligned}$$

其中, $0 < l \leq \frac{q^n-1}{N} - 1$ 。

由于 $N \mid (q^n-1)$ 且 $g_{cd}(N, \frac{q^n-1}{N}) = 1$, 可知, $t_r[\alpha^{i+jN}(1-\alpha^{lN})]$ 在 j 从 $0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1$ 遍历一遍时所取得0的次数为 $(q^{n-1}-1)/N$, 所以

$$H_{a^i}(l) = \frac{q^{n-1}-1}{N}$$

类似地, 可得序列族 \mathbf{A} 的汉明互相关为

$$\begin{aligned} H_{a^i a^l}(l) &= \sum_{k=0}^{\frac{q^n-1}{N}-1} h\left\{ t_r(\alpha^{i+kN}), t_r[\alpha^{j+(k+l)N}] \right\} = \\ & \left| \left\{ k \mid t_r[\alpha^{i+kN}(1-\alpha^{j+lN})] = 0, k = 0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1 \right\} \right| = \\ & \frac{q^{n-1}-1}{N} \quad (7) \end{aligned}$$

其中, $0 \leq l \leq \frac{q^n-1}{N} - 1$ 。

证毕。

对于序列族 \mathbf{B} , 有如下结论:

定理2:由前述得到的序列族 \mathbf{B} 的汉明自相关旁瓣值(即相对时延不为0时)不超过 $(q^{n-1}-1)/N$, 而与 \mathbf{A} 中序列的汉明互相关不超过 q^{n-1} (实际上低于该值), 也能达到很低的值, 即序列族 \mathbf{B} 可用作备用跳频序列。

证明:序列族 \mathbf{B} 的汉明自相关旁瓣值类似于定理1的证明, 这里不再重复。下面考虑其与 \mathbf{A} 中序列的汉明互相关, 根据定义有

$$\begin{aligned} H_{a^i b^l}(l) &= \sum_{k=0}^{\frac{q^n-1}{N}-1} h\left\{ t_r(\alpha^{i+kN}), t_r[\alpha^{(k+l)N}] + j \right\} = \\ & \left| \left\{ k \mid t_r(\alpha^{i+kN}) - t_r[\alpha^{(k+l)N}] = j, k = 0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1 \right\} \right| = \\ & \left| \left\{ k \mid t_r[\alpha^{i+kN}(1-\alpha^{lN-i})] = j, k = 0, 1, \dots, \frac{q^n-1}{N} - 1 \right\} \right| \quad (8) \end{aligned}$$

其中, $0 \leq l \leq \frac{q^n-1}{N} - 1$ 。

如果 $i = l = 0$, 显然 $t_r[\alpha^{i+kN}(1-\alpha^{lN-i})] = j$ 无解, 即此时 $H_{a^i b^l}(l) = 0$ 。如果 i 和 l 不同时为0, 则根据迹函数的性质, $t_r[\alpha^{i+kN}(1-\alpha^{lN-i})] = j$ 最多有

q^{n-1} 个根, 即 $H_{a^{i_b}}(l) \leq q^{n-1}$ 。

证毕。

上述 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 组成主备用跳频序列族, 其汉明相关特性呈现两级特性, 并且都取得很小的值, 而由迹函数生成的跳频序列随机性良好, 且周期达到最长, 数目也较多, 频隙均匀分布, 适用于灾害条件下配电网节点在主备用网络间的无缝切换与接入。

3 实例仿真分析

下面给出实例对所构造的两级跳频序列族进行性能分析。

选取素数 $q = 7, N = 3, G_F(q^n) = G_F(7^2)$, 则可得具有参数 (16, 3, 7) 的跳频序列族为

$$\mathbf{A} = \{a^i | i = 0, 1, 2\}$$

其中:

$$a^0 = (0, 1, 3, 3, 5, 4, 3, 6, 0, 6, 4, 4, 2, 3, 4, 1)$$

$$a^1 = (0, 2, 6, 6, 3, 1, 6, 5, 0, 5, 1, 1, 4, 6, 1, 2)$$

$$a^2 = (0, 4, 5, 5, 6, 2, 5, 3, 0, 3, 2, 2, 1, 5, 2, 4)$$

构造具有参数 (16, 6, 7) 的跳频序列族为

$$\mathbf{B} = \{b^i | i = 1, 2, \dots, 6\}$$

其中:

$$b^1 = (1, 2, 4, 4, 6, 5, 4, 0, 1, 0, 5, 5, 3, 4, 5, 2)$$

$$b^2 = (2, 3, 5, 5, 0, 6, 5, 1, 2, 1, 6, 6, 4, 5, 6, 3)$$

$$b^3 = (3, 4, 6, 6, 1, 0, 6, 2, 3, 2, 0, 0, 5, 6, 0, 4)$$

$$b^4 = (4, 5, 0, 0, 2, 1, 0, 3, 4, 3, 1, 1, 6, 0, 1, 5)$$

$$b^5 = (5, 6, 1, 1, 3, 2, 1, 4, 5, 4, 2, 2, 0, 1, 2, 6)$$

$$b^6 = (6, 0, 2, 2, 4, 3, 2, 5, 6, 5, 3, 3, 1, 2, 3, 0)$$

可以验证, 序列族 \mathbf{A} 的汉明自相关旁瓣值和汉明互相关均不超过 2, 而序列族 \mathbf{B} 的汉明自相关旁瓣值也不超过 2, 序列族 \mathbf{B} 中的序列与序列族 \mathbf{A} 中的序列的汉明互相关值不超过 4, 即 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 可组成主备用跳频序列族。

将两级跳频系统及所构造得到的主备用跳频序列族应用于灾害条件下的配电网节点接入场景中, 并采用 Matlab 仿真软件研究该配电网节点接入备用跳频系统的通信传输性能并以误码率 (bit error rate, BER) 为指标。在配电网节点终端侧, 数据采用移频键控法 (frequency shift keying, FSK) 调制后再送入跳频模块。跳频载波的中心频率的跳变规律由所设计的主备用跳频序列来控制, 且灾后的配电网

节点终端使用跳频序列集 \mathbf{B} 中不同的跳频序列, 从而实现配电网节点的无缝接入。考虑 FSK 调制的跳频系统, 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。在主站接收端, 接收到多个电力业务终端发来的信号依次进行解跳、非相干解调和判决, 最终获得有用的数据^[14]。

图 3 至图 5 给出了灾后的配电网节点终端随机接入时延下基于备用跳频序列 \mathbf{B} 在 FSK 调制的跳频通信系统分别采用单条序列、两条序列、序列族中所有序列的 BER。同时, 采用文献 [15] 中用于多址接入的低碰撞区 (low-hit-zone, LHZ) 跳频序列族作为对比。从这些仿真图可以看出, 采用所提出的主备用跳频序列族的跳频通信系统 BER 性能始终优于采用 LHZ 跳频序列族的 BER 性能, 说明所提出的两级跳频序列族可保障灾后的配电网节点终端接入的可靠性。

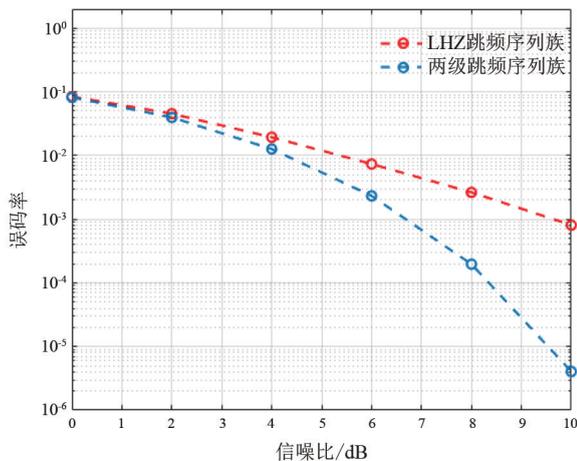


图 3 跳频序列族误码性能对比 (单条序列)

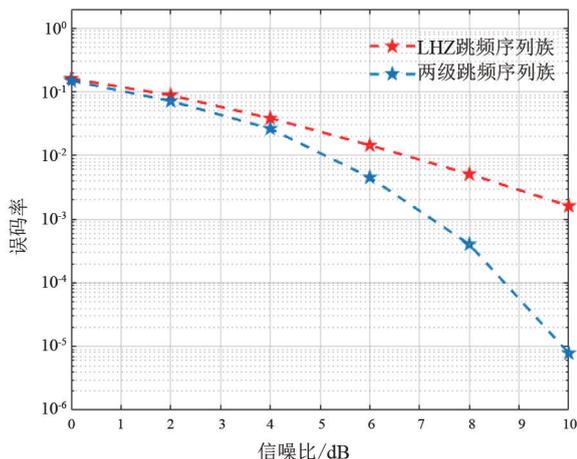


图 4 跳频序列族误码性能对比 (两条序列)

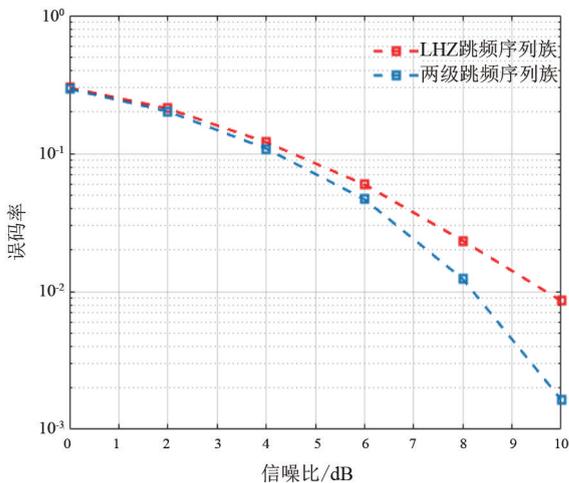


图5 跳频序列族误码性能对比(序列族中的所有序列)

4 结论

为了保障灾害条件下配电网节点的顺利通信,首先,提出了一种适用于灾害条件下的两级跳频通信系统;然后,采用迹函数的方法设计了满足该系统的两级跳频序列族,即主备用跳频序列族,并证明了该主备用跳频序列族的汉明相关值可以达到一个很低的值;最后,将主备用跳频序列族用于灾后的配电网节点终端接入场景进行仿真分析。结果表明,该序列族的 BER 特性优于传统的 LHZ 跳频序列族,证明所提新型跳频通信系统适用于灾害条件下的配电网节点接入,可保障灾后的配电网节点终端接入的可靠性。

参考文献

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
- [2] 闫涵,王建华,范须露,等.基于用户停电损失评估的有源配电网灾后供电恢复模型[J].电力系统自动化,2022,46(5):31-42.
- [3] 汪涛,武传涛,随权,等.计及故障维修与网络重构的灾后配电网综合调度策略[J].中国电机工程学报,2024,44(5):1764-1777.
- [4] 杨芳僚,陈小惠,刘津,等.电力通信接入网业务预测方法与分析[J].电力信息与通信技术,2021,19(6):91-96.
- [5] 高会生.电力通信接入网可靠性影响因素分析[J].电力信息与通信技术,2014,12(11):1-7.

- [6] 朱发强. SDH 技术在电力通信接入网中的应用[J].电力系统通信,2002,23(9):16-19.
- [7] 陈彬,于继来,周霞,等.基于网格化的极端灾后配电网电力-通信协调恢复策略[J].电网技术,2021,45(5):2009-2017.
- [8] 吴瑶.基于双网耦合关系的电力通信网鲁棒性研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [9] 车力军.电力专网的接入网建设与思考[J].电力系统通信,2002,23(6):21-24.
- [10] 霍楚妍.对业务优先级的电力调度数据网拥塞规避算法的研究[J].自动化与仪器仪表,2016(5):177-178.
- [11] 任智,吴本源,周舟,等.基于 CoAP 协议的泛在电力物联网拥塞控制算法[J].计算机工程,2021,47(10):166-173.
- [12] 冯克勤.有限域[M].长沙:湖南教育出版社,1991.
- [13] 陈燎,强诗媛,陈龙.有限域上对角方程 $ax^d+by^{2d}=c$ 的可解性[J].四川大学学报(自然科学版),2023,60(6):46-52.
- [14] ZENG Qi, ZHOU Zhengchun, LIU Xing, et al. Strong no-hit-zone sequences for improved quasi-orthogonal FHMA systems: sequence design and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8):5336-5345.
- [15] CHUNG Jin-Ho, YANG Kyeongcheol. New classes of optimal low-hit-zone frequency-hopping sequence sets by Cartesian product[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(1):726-732.

作者简介:

龙呈(1987),男,高级工程师,研究方向为配电网运行与分析;

张剑(1985),男,高级工程师,研究方向为配电网运行与分析;

张华(1985),男,教授级高级工程师,研究方向为配电网运行与分析;

刘星(1986),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为电力通信技术与信息理论;

高艺文(1989),男,高级工程师,研究方向为配电网通信与运行;

苏学能(1990),男,高级工程师,研究方向为配电网自动化;

李世龙(1989),男,高级工程师,研究方向为配电网通信与自动化;

杨勇波(1976),男,教授级高级工程师,研究方向为配电网运行与配电网自动化。

(收稿日期:2024-05-20)