

引用格式:刘策伦,陈天杰.一种主动子序列搜索的跳频同步捕获方法研究[J].微电子学与计算机,2022,39(3):58-64. [LIU C L, CHEN T J. Research on frequency hopping synchronization acquisition scheme based on active subsequence searching[J]. Microelectronics & Computer, 2022, 39(3): 58-64.]DOI:10.19304/J. ISSN1000-7180. 2021. 0721

一种主动子序列搜索的跳频同步捕获方法研究

刘策伦, 陈天杰

(北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081)

摘 要: 传统的跳频同步捕获方法中, 串行捕获方法捕获时间较长, 并行捕获方法系统复杂度高, 而使用同步引导码又容易受到干扰. 为了解决这些问题, 学界提出了一种基于子序列搜索, 以跳频序列本身来表征时间信息的捕获策略. 该策略的一种实现是基于序列部分频点匹配的同步捕获方案, 使用类似并行捕获方法的系统结构, 通过多支路检波的方法, 得到跳频序列的一个短的子序列, 并在接收端本地的跳频序列中进行搜索匹配, 进而得到当前接收的信号在跳频序列中的位置. 本文对该策略的实现进行了研究, 对子序列的获取这一关键步骤进行优化, 主动而非被动地改变接收机各个支路用于检波的频率, 增大了检波成功的概率, 加快了获得子序列的速度; 同时, 使用多路并行的方案同时进行同步确认和数字检波, 加快了捕获失败后开始下一次捕获的速度. 理论分析和仿真结果显示, 优化方案在捕获概率上, 相对基于序列部分频点匹配的方案有了较大提升; 在同等性能前提下的系统复杂度上, 相对传统的并行捕获方法和基于序列部分频点匹配的方案有了明显的降低.

关键词: 跳频同步; 跳频序列; 子序列搜索

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2022)03-0058-07

Research on frequency hopping synchronization acquisition scheme based on active subsequence searching

LIU Celun, CHEN Tianjie

(School of information and electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Among the traditional frequency hopping synchronization acquisition methods, the serial acquisition method takes a long time to acquire, and the parallel acquisition method has a high system complexity, and the use of the synchronization pilot code is susceptible to interference. In order to solve these problems, an acquisition strategy based on subsequence search is proposed to represent the time information by frequency hopping sequence itself. An implementation of this strategy is a synchronous acquisition scheme based on partial frequency point matching of the sequence. The scheme uses a system structure similar to the parallel acquisition method. Through the multi-branch detection method, a short subsequence of the frequency hopping sequence is obtained. The subsequence is searched and matched in the local frequency hopping sequence of the receiving end, and then the position of the currently received signal in the sequence is obtained. This paper studies the strategy and optimizes the frequency point search strategy in the acquisition process; actively instead of passively changes the frequency group used by the receiver for detection. This increases the probability of detection success and speeds up the subsequences obtaining. Meanwhile, a multi-channel parallel scheme is used for simultaneous synchronization confirmation and digital detection, which accelerates the next capture after the current capture fails. Theoretical analysis and simulation results show that the acquisition probability has been greatly improved compared to the scheme based on sequence partial frequency matching. On the premise of the same performance, the system complexity is significantly reduced compared to

收稿日期: 2021-05-17; 修回日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U1836201)

traditional parallel acquisition method and the scheme based on sequence partial frequency matching.

Key words: frequency hopping synchronization; frequency hopping sequence; subsequence searching

1 引言

跳频通信是现代军事无线通信抗干扰的主要手段,对于在恶劣的电磁环境中保障信息畅通有着重要意义^[1].跳频同步是跳频通信系统的关键,传统的同步方法分为外同步法和自同步法.

外同步方法包括参考时钟法、独立信道法和同步字头法.独立信道法由于隐蔽性较差,容易受到干扰的缺点,应用受到了很大限制;参考时钟法已在工程实践中发展得较为成熟^[1].目前的研究多集中于使用 TOD 信息的同步字头法,例如:文献[2]提出使用伪码同步辅助基于 TOD 信息的同步,针对 DS/FH 通信系统,使用直扩的伪码对 TOD 同步的误差进行修正,即首先使用 TOD 信息进行粗同步将收发两端相位差缩小到一定范围内,然后通过计算伪码的相位差得到精确的收发双方的时间差,提高了同步速度和精度;文献[3]在 TOD 同步的基础上结合并行捕获的思想,提出一种使用双通道结构的同步方法,使用两个接收通道并行进行 TOD 的信息获取,以缩短同步时间,提高同步的隐蔽性和抗干扰能力.目前对于同步字头法的研究多集中于将同步字头和其它的同步方法结合的方式.同步字头的隐蔽性能和抗干扰性比较差,一旦同步字头受到干扰,则整个系统将无法工作^[4].

传统的自同步捕获方法包括串行、并行和串并行结合的方法,不需要同步头,可以节省发送功率和带宽,而且具有较强的抗干扰能力和组网灵活的优点,但同步时间比较长^[5].对于自同步方法的研究,多集中于对传统方法的改进上.为缩短同步时间,文献[6]提出了一种基于淘汰判决的自同步方案,其原理是在传统串行方法的基础上,加入了更优化的搜索策略,即并非一次将接收端本地跳频序列相位移动一个频点,而是一次移动多个频点,在保证抗干扰性能与系统复杂度的同时,相比串行捕获缩短了捕获时间.基于并行捕获的系统结构,文献[7]提出了一种基于子序列搜索,以跳频序列本身来表征时间信息的策略,并基于该策略提出了一种实现方法,快速得到当前接收信号在跳频序列中的位置,相对并行捕获方法,显著降低了系统复杂度,提升了捕获速度.

本文对基于子序列搜索的策略进行研究,并提

出在实现该策略时的具体方法和其性能分析,相较于文献[6]的实现方案,具有更好的抗干扰能力和更快的捕获速度,进一步验证了这种跳频同步捕获策略的可行性和优点.

2 捕获策略原理和改进

文献[7]中,基于子序列搜索的跳频同步捕获策略的基本思想和实现方法如下.

假设通信收发双方共用一个跳频序列 F .发送方根据其本地的时间,从跳频序列中选取一个开始的位置,并随时间从序列中依次向后选取跳频频率.接收机整体和并行捕获方案类似,采样得到的数字信号输入到多条支路中,分别进行混频、滤波、低通滤波和平方检波.对多路检波的输出进行门限判决和能量比较,并记录接收到的频点,形成一个接收子序列.当接收子序列的长度足够时,就可以在跳频序列中找到唯一匹配的一个位置,则该位置就是当前接收信号在跳频序列中的位置,即实现了同步捕获.随后进行捕获确认.确认的过程和传统自同步方法相同,即选取一条支路,使其混频频率和当前跳频频点所在位置对应,并按照跳频序列进行变化,如果在连续的多跳时间内该支路都能接收到跳频信号,那么说明当前的位置寻找正确.

该策略的核心问题是如何快速得到一个足够长的子序列,使得和它匹配的位置有且仅有一个.假设跳频通信系统使用的频点数为 N ,接收机共有 m 条支路,所需要搜索的跳频序列长度为 L ,根据文献[7],得到一个足够长的序列需要时间将和 N/m 成正比,与 L 成正相关,当 $L = 120\ 000$, $N = 512$, $m = 21$ 时,需要接收到 5 个频点才能确保匹配位置唯一.在跳频速率不高的情况下,这可能导致需要的捕获时间相对于非自同步的方案来说较长,而跳频速率较高时,又容易出现误检^[8],而误检带来的时间代价是较高的^[7].

因此,该策略的实现需要一种更好的子序列获得和搜索方法.注意到这样一个事实:在检测到一些频点之后,虽然并不能使得匹配的位置唯一,但是匹配位置的总数相对于接收机支路的数量并不是很多^[7].利用这一点,可以将之后的频点搜索集中于这些可能是正确位置的若干个匹配位置上,主动地更换接收机支路的混频频率,以增加检波成功的概率.

个不同的值,且 $m \leq M$. 若 $m < N$, 从这 m 个频率中随机选取 n 个作为 n 条支路的新的混频频率,以增大下一跳检波成功的概率. 若 $m < n$, 则将前 m 条支路的频率分别设为这 m 个频率, 剩余 $n - m$ 条支路的频率从这 m 个频率以外的 $N - m$ 个频率中随机选取. 若 $m = N$, 则改变支路频率并不能增大检波成功的概率, 所以保留当前的支路频率, 继续进行之后的检波.

在下次任意支路检波大于门限前, 根据跳频序列中的 M 个位置不断更新支路的频率, 即在检测到 f_{i_1} 频率之后的第 j 跳时间内, 考察下一跳频率 $F_{h_1+j+1}, F_{h_2+j+1}, \dots, F_{h_{M-1}+j+1}, F_{h_M+j+1}$ 中不同频率的数量, 按照上述逻辑更新支路的频率.

在第二次有支路检波超过门限后, 接收机得到的跳频子序列如下:

$$?, \dots, ?, f_{i_1}, ?, \dots, ?, f_{i_2}$$

此时在收发双方时间误差范围内搜索子序列, 得到 M' 个匹配位置, 其下一跳有 m' 个可能的频率. 同样地, 若 $M' \leq n$, 则直接进入捕获确认状态; 若 $M' > n, m' < N$, 则改变接收机支路的混频频率.

接收机将不断进行多支路的检波, 直到某次有支路检波超过门限时, 搜索匹配到的位置数量小于等于 n , 则进入捕获确认状态.

2.2 捕获确认状态

当搜索跳频子序列得到匹配位置的数量 M 小于等于接收机支路数量 n 时, 接收机进入捕获确认状态. 进入该状态时, 首先清除之前的接收到的子序列, 但是保留最后一次搜索匹配得到的匹配位置. 依然将匹配的 M 个位置记为 $h_1, h_2, \dots, h_{M-1}, h_M$, 因为当前信号在跳频序列中必然处于这 M 个位置之一, 所以将 M 条支路用于捕获确认. 其中第 i 条支路的频率按照 $F_{h_i+1}, F_{h_i+2}, F_{h_i+3}, \dots$ 的规律变化, 以检测接收信号的频率是否处在跳频序列的 h_i 位置. 经过 k 跳时间后, 选取检波超过门限跳数最多的那条支路, 检验其跳数是否达到阈值, 若达到阈值则认为捕获确认成功. 之后接收端根据捕获确认成功的支路在跳频序列中的位置, 调整本地时间, 再进入跳频跟踪和正常通信的状态. 通常跳频序列的周期会很长, 则根据跳频序列的特性, 只要 k 的值足够大, 检验阈值选取合理, 可以确保不会有多于一条支路同时达到阈值^[8].

另外, 在 $M < n$ 时, 如果仅进行捕获确认, 会有 $n - M$ 条支路处在空闲状态. 可以将 N 个跳频频点平均分成 n 组, 在其中的 $n - M$ 组内每组随机选取一

个频点作为这 $n - M$ 条支路的频率, 使其工作在频点搜索状态, 提前开始下一次捕获的进程. 若捕获确认失败, 则给 M 条处于捕获确认状态的支路分配频率, 同时继承之前 $n - M$ 条支路得到的接收子序列, 以全部支路继续进行频点搜索.

3 理论性能分析

3.1 抗干扰性能

跳频通信系统的抗干扰性能主要表现为漏捕概率和虚警概率.

对于一条混频频率和接收到的跳频信号的频率对应的支路, 平方检波器输入为:

$$s_1(t) = A \cos(\omega t + \theta) + g(t) \quad (1)$$

对于一条混频频率和接收到的跳频信号的频率不对应的支路, 平方检波器输入为:

$$s_0(t) = g(t) \quad (2)$$

式中, $g(t)$ 为零均值高斯噪声, 方差为 σ^2 . 则其漏捕概率 P_M 和虚警概率 P_F 分别为^[1]:

$$P_M = 1 - Q_M(\sqrt{s}, \sqrt{R}) \quad (3)$$

$$P_F = Q_M(0, \sqrt{R}) \quad (4)$$

设支路检波的门限为 V_T , 则上式中 $s = A^2 / \sigma^2$, $R = V_T / \sigma^2$, Q_M 为 MarcumQ 函数. 则对于 n 条支路的接收机来说, 其系统漏捕概率 P_{SM} 和系统虚警概率 P_{SF} 分别为^[1]:

$$P_{SM} = P_M(1 - P_F)^{n-1} \quad (5)$$

$$P_{SF} = [(N - n)P_{SF1} + nP_{SF2}] / N \quad (6)$$

式中, P_{SF1} 和 P_{SF2} 分别为接收到的跳频信号不和任一支路频率对应时的虚警概率, 和接收到的跳频信号和某一支路频率对应时, 其它支路的输出存在更大值且超过门限时的虚警概率:

$$P_{SF1} = 1 - (1 - P_F)^n \quad (7)$$

$$P_{SF2} = [1 - (1 - P_F)^{n-1}](1 - P_Z^{n-1}) \quad (8)$$

式中, P_Z 为频率对应支路相比一条频率不对应支路输出更大且超过检波阈值的概率:

$$P_Z = \int_R^\infty [1 - F_Z(x)] F_{Z_n}(x) dx \quad (9)$$

式中, $F_Z(x)$ 和 $F_{Z_n}(x)$ 分别为有和没有对应频率信号输入, 支路的平方检波器输出概率密度函数, 它们均为非中心卡方分布的概率密度函数^[9].

3.2 捕获概率

在第一次有支路检波超过门限前, n 条支路的频率是在 N 个频点里均匀随机选取的, 因此正确检测到第一个频点所需跳数的概率密度函数为:

$$f_1(x) = \frac{n}{N} (1 - P_{SM}) \times \left[\frac{N-n}{N} (1 - P_{SF1}) + \frac{n}{N} P_{SM} \right]^{x-1} \quad (10)$$

在检测到第一个频点后,在长度 $L = 2v\Delta t$ 的跳频序列子串中搜索该频点的位置,此时搜索匹配到的位置数量 M_1 的期望为 L/n .

对于 M 个匹配位置,其可能出现的不同频率数量的概率密度函数如下:

$$h(m) = g(M, m) / N^M \quad (11)$$

式中,的 $g(M, m)$ 根据动态规划的理论^[10],由如下的递归式确定:

$$g(M, m) = m \cdot g(M-1, m) + m \cdot g(M-1, m-1) \quad (12)$$

使得该式停止递归的边界条件为:当 $M = m$ 时, $g(M, m) = m!$; 当 $m = 1$ 时, $g(M, m) = 1$.

从无误地检测到 $j-1$ 个频点之后,到检测到第 j 个频点所需的跳数的概率密度函数为:

$$f_j(x) = f_1(x) \quad (13)$$

当 $m < N$ 且 $m > n$ 时,

$$f_j(x) = \frac{n}{m} (1 - P_{SM}) \times \left[\frac{m-n}{m} (1 - P_{SF1}) + \frac{n}{m} P_{SM} \right]^{x-1} \quad (14)$$

当 $m \leq n$ 时,

$$f_j(x) = P_{SM}^{x-1} (1 - P_{SM}) \quad (15)$$

完成一次频点搜索状态所需跳数的概率密度函数为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{q-1} \left(\prod_{j=1}^q f_j(s_{ij}) \right) \quad (16)$$

式中, q 为进入捕获确认状态前需要检测到的频点数量, s_{ij} 为在第 i 种时间分配情况下,从无误地检测到 $j-1$ 个频点之后,到检测到第 j 个频点所需的跳数,并满足:

$$\sum_{j=1}^q s_{ij} = x, \quad \forall i \in [1, C_{x-1}^q] \quad (17)$$

那么,一个完整的频点搜索状态所需时间的期望为:

$$T_s = t_h \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot f(i) \quad (18)$$

式中, t_h 为一跳的驻留时间.

另外,随着检测到的频点数量增加,子序列搜索匹配的位置数 M 会急剧下降^[7],因此 m 的值也会快速下降,于是概率密度函数 $f_j(x)$ 会向 $x = 0$ 逐渐贴

近,即相比文献^[7]的在捕获失败前固定接收机支路的频率,主动地改变支路频率更可能在更短时间内检测到再次检测到频点,以完成频点搜索.

当某次检测到一个频点时,搜索匹配到的位置数量 $M_q \leq n$ 时,接收机进入捕获确认状态,为了有效地确认捕获,需要保证在 k 跳时间内,只有一条支路检波超过门限的跳数达到阈值 k_0 . 因此捕获确认成功地概率为:

$$P_c = P_s \prod_{i=1}^{M_q-1} P_{d_i} \quad (19)$$

式中, P_s 为和接收的跳频信号在跳频序列中位置匹配的支路检波超过门限的跳数超过阈值的概率, P_{d_i} 为其余 $M_q - 1$ 条处于捕获确认状态的支路中的一条检波超过门限的跳数未达到阈值的概率.

进入捕获确认状态前需要检测到的频点数量 q , 和检测到第 i 个频点之后搜索当前子序列得到的匹配位置数 M_i , 和接收机支路数, 跳频频点数 N 以及跳频序列的设计有关. 考虑典型的基于 m 序列和 L-G 模型的跳频序列, 周期为 $2^{36} - 1$, 在跳频速率为 200 跳每秒, 收发两端时间差最大为 300 秒的情况下, 在检测到 2 个频点之后, 接收子序列在搜索范围内的匹配位置数量已下降到平均小于 10 的水平^[7]. 相比基于序列部分频点匹配的自同步方案在上述情况下选择在检测到 5 个频点, 确保只有一个匹配位置后再开始捕获确认, 本文算法能在接收机支路数合理的情况下, 更快进入捕获确认.

4 仿真结果

基于 Matlab 软件, 使用蒙特卡洛算法, 随机化收发两端的时间差和使用的跳频序列, 从限定时间内的捕获概率和接收机系统复杂度两方面进行仿真. 跳频频点数 $N=512$, 跳频序列基于 m 序列和 L-G 模型生成, 周期为 $2^{35} - 1$, 跳频速率为每秒 500 跳, 收发两端的时间差最大为 180 秒.

将接收机支路数设置为 16, 在 AWGN 信道下进行仿真, 本文方案和文献^[7]方案在 0.5 秒内的捕获概率如图 3 所示. 可以看到, 本文方案在捕获概率上有了显著提升; 从另一个角度, 即抗噪声性能有了显著增强.

在信噪比为 0 dB 的情况下, 比较接收机支路数量不同时的平均捕获时间, 仿真得到的结果如图 4 所示. 可以看到, 在同样的捕获时间要求下, 本文方案所需的系统复杂度大大降低.

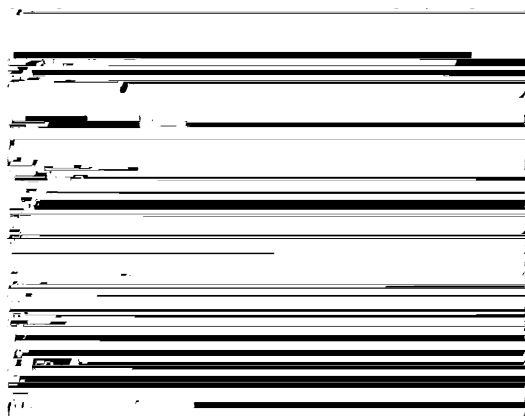


图3 不同信噪比下的捕获概率

Fig. 3 Acquisition probability in different SNR

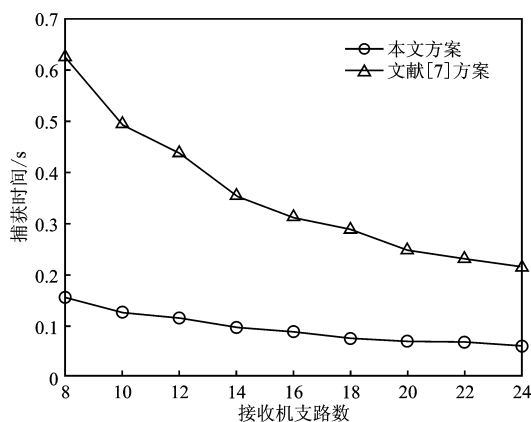


图4 不同接收机支路数所需的平均捕获时间

Fig. 4 Average acquisition time of different number of branches

5 结束语

经过对基于子序列搜索,以跳频序列本身来表征时间信息的捕获策略的深入研究、分析和仿真,本文将该跳频同步捕获策略的具体实现进行了改进,显著提升了捕获概率,降低了系统复杂度.结合现今的工程实践,本文提出采用数字信号处理的方式进行混频、滤波和检波等操作,使其更具有可实现性.受到采样位宽的限制,在信噪比很低时,滤波器可能会将信号完全滤除,此时就无法进行检波.为了保持较低的系统复杂度,可以使用模拟和数字电路结合的方式实现该跳频同步捕获策略.

在实际的工程应用中,本文的改进方案对于跳频频点数量较多、跳频序列周期较长的跳频通信系统,尤其是在需要使用自同步法来提高通信隐蔽性的环境中,能实现较明显的同步性能提升.另外,使用跳频序列本身表征时间信息的策略对跳频序列的依赖较高,在该策略的基础上结合更好的跳频序列

设计,则又能一定程度提升抗干扰性能.抑或是使用多个不同的跳频序列,通过自适应地在几个序列之间快速切换,提升抗频带干扰和多音干扰的能力^[11].

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.
MEI W H, WANG S B, QIU Y H, et al. Frequency-hopping communications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [2] 欧春湘,吴智杰. TOD-伪码同步辅助快跳频同步方法[J]. 现代防御技术, 2018, 46(2): 93-98. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-086x. 2018. 02. 016.
OUC X, WU Z J. Synchronization scheme for frequency hopping communication system based on TOD and PN code synchronization[J]. Modern Defense Technology, 2018, 46(2): 93-98. DOI: 10.3969/j. issn. 1009-086x. 2018. 02. 016.
- [3] 孙慧贤,张玉华,唐友喜,等. 双通道跳频通信系统同步捕获方法[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(6): 23-32. DOI: CNKI:SUM:XDDYN. 0. 2019-06-005.
SUN H X, ZHANG Y H, TANG Y X, et al. Synchronized acquisition method for dual channel frequency hopping communication system[J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(6): 23-32. DOI: CNKI:SUM:XDDYN. 0. 2019-06-005.
- [4] 郭黎利. 具有 DS/FH 频谱特性的复合序列扩频通信方式[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1998, 19(4): 24-30. DOI: CNKI:SUM:HEBG. 0. 1998-04-04.
GUO L L. Communication mode of composite sequence spread spectrum with DS/FH spectrum feature[J]. Journal of Harbin Engineering University, 1998, 19(4): 24-30. DOI: CNKI:SUM:HEBG. 0. 1998-04-04.
- [5] 杨晓君,卢盛杰. 短波跳频通信快速扫描式自同步方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(4): 63-68. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-7043. 2000. 04. 016.
YANG X J, LU S J. The method of quick scanning self-synchronization in short-wave hopping communication[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(4): 63-68. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-7043. 2000. 04. 016.
- [6] 赵祥武,全厚德,崔佩璋. 基于淘汰判决的跳频同步捕获方案设计[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(4): 415-418. DOI: 10.3969/j. issn. 1003-3114. 2019. 04. 016.
ZHAO X W, QUAN H D, CUI P Z. Design of frequency hopping synchronization acquisition scheme

based on elimination decision[J]. Radio Communications Technology, 2019, 45(4): 415-418. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2019.04.016.

[7] 赵祥武, 全厚德, 崔佩璋. 基于序列部分频点匹配的跳频自同步方案[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(4): 66-71. DOI: CNKI:SUM:XDYX.02019-04-014. ZHAO X W, QUANH D, CUI P Z. Frequency hopping self-synchronization scheme based on sequence partial frequency point matching[J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(4): 66-71. DOI: CNKI:SUM:XDYX.02019-04-014.

[8] 牛宪华. 跳频扩频序列理论与设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. NIU X H. The bound and design of hopping spreading sequences[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[9] 魏艳华. 跳频通信系统同步捕获技术仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007. WEI Y H. The simulation research on synchronization acquisition technology of frequency hopping communication system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[10] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, et al. Introduction to algorithms [M]. 3rd ed. Cambridge: The MIT Press, 2009.

[11] 张晓璐, 全厚德, 孙慧贤, 等. 对偶序列跳频通信系统的等待匹配式自同步捕获方法[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(1): 88-94. ZHANG XL, QUANH D, SUN H X, et al. Waiting-matching self-synchronous capture scheme for dual-sequence frequency hopping communication system[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(1): 88-94.

作者简介:

刘策伦 男, (1983-), 博士, 硕士生导师. 研究方向为跳频通信技术.

陈天杰(通讯作者) 男, (1997-), 硕士研究生. 研究方向为通信工程. E-mail: tj_chen@outlook.com.