

基于 STFT 与 G 函数相结合的短波 DFH 跳检测方法

刘忠英,张毅,姚富强

(总参第 63 研究所,江苏南京 210007)

摘要: 差分跳频利用频率的跳变携带信息,只要正确检测出每跳的频率,就可以恢复出信息.本文提出一种基于 STFT 的跳检测方法,并与 G 函数相结合来分析短波 DFH 信号在每跳时间间隔内的频率特性,以检测可能的跳频率.仿真结果表明,在短波信道几种可能的情况下,检测效果良好.

关键词: 短时傅立叶变换 (STFT); 差分跳频 (DFH); 跳检测; G 函数

中图分类号: TN97 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 01-0013-04

HF DFH Hop-Detecting Method Based on STFT and G Function

LIU Zhong-ying, ZHANG Yi, YAO Fu-qiang

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

Abstract: The information is carried through the hopping of frequency in DFH(Differential frequency hopping). If only the frequency is detected out, the information can be recovered. One method of hop-detecting based on STFT is put forward, and the frequency features of HF DFH signal in one-hop time is analyzed through it in this paper. Combining with the G function, it can detect the possible frequency. The simulation shows the detecting result is good in several kinds of HF channel.

Key words: STFT; DFH; hop-detecting; G function

1 引言

短波差分跳频 (DFH: Differential Frequency Hopping) 是近年来出现的一种全新的跳频体制,它利用前后频率的相关性来携带信息,以高跳速来提高数据率,跳速可高达 5000 跳/秒,数据率可达 19.2 Kb/s^[1,2]. 自从美国 Sanders 公司推出 DFH 技术以来,它受到了国内学术界的广泛关注.目前,对 DFH 技术的研究主要集中在其核心算法 G 函数以及短波 DFH 系统的性能研究上^[2-4],但关于 DFH 跳检测方法的研究成果尚不多见.跳检测是 DFH 实现的关键技术之一,因为 DFH 携带信息的机制与传统跳频有根本的区别,在差分跳频体制下,收端无法像传统跳频那样解跳时先预知跳频频率序列,而是需要准确检测出每一跳的频率,然后才能正确地恢复信息.可见,DFH 跳检测技术无法借鉴传统的跳频频率检测方法.同时,在跳速高达几千跳/秒的短波差分快速跳频通信中,短波空中信道群时延和多径特性对接收端跳频信号的影响较传统短波低速跳频信号有很大的不同,主要表现为不仅在任一跳间隔内频率不唯一,而且收、发端跳信号在时间上无法同步,这给收端跳检测带来了很大的困难,因此需要研究适合本问题的有效跳检测方法.本文对跳检测涉及到的收端信号特点和跳检测方法进行了深入的研究,采用 STFT 来分析接收信号每跳时间内的频率特性,并与 G 函数相结合,以检测可能的跳频率,可望较好地解决这一技术难题.这对于短波 DFH 系统的进一步研究具有重要意义.

2 短时傅立叶变换

短时傅立叶变换 (STFT: Short Time Fourier Transformation) 作为一种时频分析方法,广泛地应用于各个领域的信号分析和处理.其基本思想是:把信号划分成许多小的时间间隔,用傅立叶变换分析每一个时间间隔,以便确定在相应时间间隔

内存在的频率.为了研究信号在时间 t 的局部特性,需要加强在时间 t 的信号,而压缩在其它时间的信号,这可通过用中心在 t 的窗函数 (t) 与信号相乘来实现.即通过加窗把所关心的信号取出来,这时的信号变为:

$$s_t(\cdot) = s(\cdot) \cdot (t) \quad (1)$$

可见取出的信号是两个时间的函数,即所关心的固定时间段参考点 t 和执行时间.窗函数决定了取出的信号围绕时间 t 大体上不变,而离开所关心时间 t 的信号被大大压缩,即:

$$s_t(\cdot) = \begin{cases} s(\cdot) & \text{对于 接近 } t \\ 0 & \text{对于 远离 } t \end{cases} \quad (2)$$

加窗后的信号强调了围绕时间 t 的信号,其傅立叶变换将反映围绕时间 t 的频率分布,即:

$$STFT_s^{(t)}(t, f) = [s(\cdot) \cdot (t)] e^{-j2\pi f d} \quad (3)$$

这即是信号 $s(t)$ 的短时傅立叶变换.由式 (3) 可知, $STFT_s^{(t)}(t, f)$ 表示 $s(\cdot) \cdot (t)$ 的傅立叶变换,一般,窗 (t) 非常短,信号 $s(t)$ 乘以一个相当短的窗等价于取出信号在分析点 t 附近的一个切片,所以 STFT 反映了信号在“分析时间” t 附近的“局部谱”.本文正是利用这一点,来分析和检测跳变信号在所关心时间 t 附近的频谱特性.

和其它时频分析手段一样,STFT 的时间分辨率 t 和频率分辨率 受测不准原理的限制^[5],即:

$$t \cdot 1/2 \quad (4)$$

也就是说,要想得到高时间分辨率需要用短的时宽,而要想得到高的频率分辨率则需用长的时宽,即不存在短时宽又窄带宽的窗函数.可见,窗函数的特性对 STFT 非常重要,要想得到合适的时间或频率分辨率,窗函数应该作合理的选择.一

般要求 (t) 在某个时间和频率附近聚集,例如 (t) 为 Gauss 窗, (t) 和其傅立叶变换 $R(f)$ 在零点周围聚集,且其时宽和频宽特性满足测不准原理。

和连续傅氏变换一样,对任何 STFT 的应用而言,都必须采用离散形式,即离散短时傅立叶变换 (DSTFT: Discrete STFT):

$$S(n, k) = \text{STFT}_y^j(nT, kF) = \sum_{m=0}^{N-1} [s(m) \cdot (m - nT)] e^{-j2\pi kFm} \quad (5)$$

其中 N 为窗函数的分析宽度。

3 短波 DFH 收端信号分析

要正确检测 DFH 高速跳频信号,必须先明确其特点。一个典型的短波 DFH 系统如图 1 所示。图 1 中 G 函数为 DFH 的映射规律,其一般定义为: $f_n = G(f_{n-1}, X_n)$, 其中 f_n, X_n 分别为当前时刻的频率值和频率符号, f_{n-1} 为上一跳的频率值。 G 逆函数为 G 函数的逆变换,接收端经跳检测得到频率后,由其恢复出数据。有关 G 函数和 G 逆函数的特点详见文献 [2]。图中经过短波信道、接收机和下变频后的信号 $x(t)$ 即是我们所关注的信号,这里称之为接收信号。

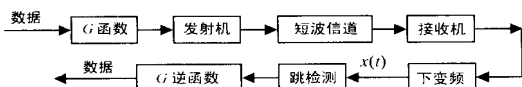


图 1 短波 DFH 系统框图

短波 DFH 系统跳速高达 5000 跳/秒,在高速跳的条件下,短波信道和接收机对 $x(t)$ 和传统低速跳频信号的影响是完全不同的。第一,由于短波信道是一个多径信道,经过不同路径到达接收端的信号所用时间不同,此即多径时延。在多径时延的影响下,发送端发出的一串跳频信号,到达接收端之后变成了多串跳频信号的叠加。以其中任意一串跳频信号作为检测的基准,其它的多径信号对它都是一种干扰。由于系统跳速为 5000 跳/秒,即每跳时间间隔为 200 μ s,而短波多径时延 95% 都集中在 0.5ms ~ 4.5ms 之间,所以某一跳的信号经过多径时延后的信号将不会出现在本跳时间间隔内,而是会对其后的几跳信号形成干扰,可见这种干扰是同跳速、同频率集且不同频率的干扰,这种干扰导致一跳间隔内有多个频率存在,

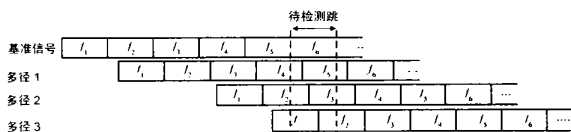


图 2 多径对接收信号影响的示意图

非常难以排除,如图 2 所示。而在传统低速跳频中,多径效应的影响主要是对本跳的信号造成影响,使其幅度呈现瑞利衰落。不过,在高速跳系统中,多径效应却不会造成有用信号的幅度发生像瑞利衰落那样的起伏变化,有用信号的幅度基本不受多径的影响。第二,在高速跳条件下,信道群时延将对短波高速跳系统的收端信号造成极大影响。在短波信道中,沿同一路径传播的不同频率的信号将有不同的传播速度。也就是

说,沿同一路径到达的前一跳和后一跳的信号之间的时延差将不再等于一跳的时间间隔,而是加入了群时延的时延差因素。研究表明^[6],短波信道群时延一般在几十 μ s/MHz 的数量级,例如 50 μ s/MHz。在跳速高达 5000 跳/秒的条件下,跳频带宽为 2MHz 左右时,群时延所引起的时延差可达到一跳时间间隔的一半,在这种情况下,群时延将使收端无法准确的判断每一跳的起始位置,确定每跳的起始点,也就是说,跳信号在

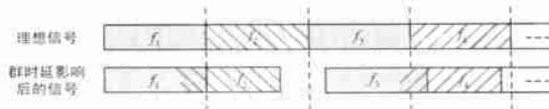


图 3 群时延对接收信号影响的示意图

时间上无法同步,如图 3 所示。而在传统低速跳频中,每跳时间间隔远远大于短波信道引起的群时延差,所以短波信道群时延的影响不用考虑。第三,在传统短波低速跳频体制中,信道多普勒效应的影响不可忽略,而在高速 DFH 体制中,多普勒效应的影响可以忽略。这是因为短波信道的相干时间 T 为 1 ~ 10 秒,而每跳的时间间隔 t 仅为 200 μ s, $t \ll T$,所以在一个跳间隔时间内,可以近似的认为信道的衰减和相移特性恒定,即不考虑一个跳间隔时间内信道的时变特性。第四,在传统低速跳频系统中,信道机的群时延对收端跳频信号有较大的影响,而在 DFH 系统中,采用宽带全跳频频段搜索接收方式,所以不存在传统低速跳频中的接收滤波器所造成的信道机群时延影响。

综上所述,由于 DFH 的高跳速和短波信道特性的影响,接收信号至少有两个显著不同于传统低速跳频接收信号的新特点:

- (1) 任一跳间隔内频率不唯一;
- (2) 收、发端无法完成跳信号在时间上的同步。

由于 DFH 携带信息的机制,使收端不可能像传统跳频体制解跳时先预知跳频图案,而是需要逐跳地检测每一跳的频率。但上述这些信号特点给 DFH 体制下的跳检测带来了很大的困难,它要求接收端能异步分析每跳时间间隔内的频率特性。由前面的分析可知,STFT 具有分析一个信号在任意时间点附近信号频率特性的能力,因此可以利用 STFT 分析一跳时间间隔内的频率特性。在此基础上再利用发端 G 函数的算法规律来筛选可能的频点,删除多余的频点,进而寻找一条满足 G 函数算法规律的频率变化路径,即所需要的跳频频率序列。下面给出基于 STFT 与 G 函数相结合的跳检测方法。

4 基于 STFT 与 G 函数相结合的跳检测方法

在进行 STFT 分析时,应先选取窗函数。与其它窗函数相比,Gauss 窗具有最小的时间分辨率和频率分辨率乘积,即在测不准原理或 Heisenberg 不等式中时宽和带宽的乘积取等号^[5],即:

$$t \cdot \omega = 1/2 \quad (6)$$

所以 Gauss 窗具有最好的时间或频率定位能力。因此本检测方案选 Gauss 窗作分析窗。由于 $R_h = 5000$ 跳/秒,所以设窗口长度为 200 μ s,每次窗口移动 200 μ s。

跳检测方法如下:

- (1) 给来到的任意接收信号加窗,即窗函数与接收信号相乘,取出窗所限定的那部分信号,并认为是当前的一跳信号;
- (2) 将窗取出的信号作 STFT 变换;
- (3) 取出当前窗变换结果中所有频点的最大幅度值;
- (4) 以最大幅度的 $1/2$ 作门限,取出当前变换中所有大于门限的频点;
- (5) 由(4)取出的频点中,用 G 函数的算法规律删除一些在当前跳不可能出现的频点;
- (6) 保存剩余的频点,这些频点即是可能有效的频点,窗向后推移 $200\mu\text{s}$;
- (7) 回到(1)~(6),接收、检测下一个跳时间间隔的信号的可能有效频点,并存储;
- (8) 用 G 函数的算法规律逐跳筛选这些按跳存储的频率,经过筛选一定的存储长度后,就可以选取一条满足 G 函数算法的路径,即是要检测的频率路径。

在上面的检测方法中选取每一跳中最大幅度的 $1/2$ 作为门限,这是一种相对门限,它会随着信道条件、信号幅度在每跳进行自适应调整。在正常情况下,有用频率的幅度一般都能通过这个门限的检测,这是因为: 由前文分析可知,在高速跳系统中,多径不像在低速跳系统中那样造成本跳信号幅度出现忽大忽小(有时大于门限,有时小于门限)的明显变化。由于基本上不存在多径干涉衰落,所以接收信号的幅度主要受信道的吸收衰落影响。这种衰落属于慢衰落,且对整个短波频段的影响程度是相同的^[7]。所以,虽然多径会造成同跳速、同频率集且不同频率的干扰,但这种干扰的幅度不会突然比有用频率的幅度大很多而使其小于门限。而且,在通信之前和通信过程中一般都有自适应选频技术来保证频率集中的频率可用,以避免出现某些频率突然不可用而造成该频率小于门限的情况。短波跳频电台在正常工作时的接收端最小输入信噪比一般为 $10 \sim 20\text{dB}$ ^[7],在此条件下,有用频率的幅度总是能大于一跳中最大幅度的 $1/2$,这也为后面的仿真所证实。

当然,在信道条件发生突变的情况下,仍然可能导致检测不到有用频率,这主要表现为两种情况。第一种是频率集中的频率都检测不到了。信道的剧烈变化,例如电离层扰动等,将导致这种情况的出现。在这种恶劣的信道情况下,各种通信方式都将产生较大的误码率,本文的检测方法也不例外。此时,接收端在一跳、甚至几跳内将无法检测到所有频率,因此这几跳也就无法筛选出符合 G 函数算法的路径。第二种情况是没有检测到有用频率,即有用频率没有通过门限。由前文分析可知,这种情况出现的可能性很小,那么出现连续几跳检测不到有用频率的可能性就更小了。因此,可以认为,这种情况一般只会出现一跳检测不到有用频率,这时该跳将产生误码。以上两种情况均会造成通信中的误码,但当再次能检测到有用频率时, G 函数将重新开始跳频频率序列的筛选。

从跳检测方法的步骤可见,本方法不是像传统跳频那样依靠预知跳频图案来解跳,而是用 STFT 分析每个窗内当前跳的频率特性,以便取出每跳可能的频点。而且,用于 STFT 分析的窗与接收信号不需要同步,是异步加在信号上的,这就是说,加窗避免了收、发跳信号时间上同步的难题,最后,用 G

函数的算法规律来删除不可能出现的频点,消除每跳时间间隔内频率的不唯一性。所以,采用 STFT 分析和 G 函数删除频点、选取路径相结合的方法基本解决了在高速跳条件下由于短波信道的影响而给跳检测带来的困难。

5 仿真及结果

如前所述,对接收端跳检测影响最大的因素是信道的群时延和多径效应,它们不仅使跳信号无法在时间上收、发同步,而且在任一跳时间间隔内频率不唯一。因此以下主要针对信道群时延和多径情况在一跳时间间隔内对跳检测的影响进行仿真,仿真原理框图如图 4 所示。

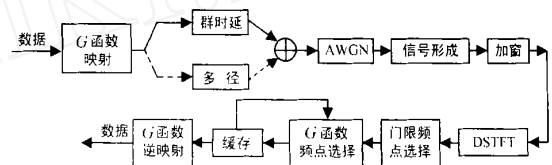


图 4 仿真原理框图

仿真条件:这里考虑接收端经过下变频后的基带信号,根据 G 函数生成的跳频序列和信道条件来构造信号,跳频信号频率为: 10kHz 、 20kHz 、 30kHz 、 40kHz 、……、 1280kHz ,共有 128 个频率,即频率集大小为 128。每跳发送信号为矩形脉冲,跳速 $R_h = 5000$ 跳/秒,跳频信号的频谱按邻道相接方式分布,这时信号的总带宽为 1280kHz 。窗取分析宽度为 $200\mu\text{s}$ 的 Gauss 窗, $\text{SNR} = 9\text{dB}$ (这属于信道条件较差的情况)。在 AWGN 条件下,考虑信道群时延、多径效应以及它们的综合三种情况,在每 $200\mu\text{s}$ 的时间内用 STFT 分析当前跳的频率特性,其结果如图 5、6、7、8 所示。其中图 5 是仅考虑高斯白噪声时收端信号的频谱图,图 6、7、8 是分别考虑信道群时延、多径和它们综合影响下收端信号的频谱图。

从图 5、6、7、8 可得如下几点结论:

(1) 从时域上看,群时延的作用会使邻近跳的频率进入 Gauss 窗,但由于 Gauss 窗对其中心附近信号的加强以及对远

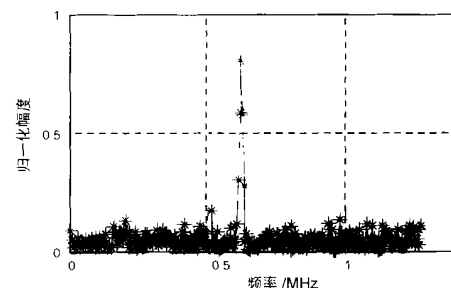


图 5 仅有高斯白噪声情况

离其中心位置的信号的抑制作用,会使进入 Gauss 窗的邻近跳频率得到较好的抑制,使这些信号的幅度降低,如图 6 所示的频谱图:

(2) 在图 7 中,由于多径效应,虽然会有多个频率进入 Gauss 窗,但有用信号的幅度却不会受其影响;

(3) 由图 8 可知,在综合以上两种因素的情况下, Gauss 窗内会出现多个频率,同时由于多径和群时延的共同作用,会使

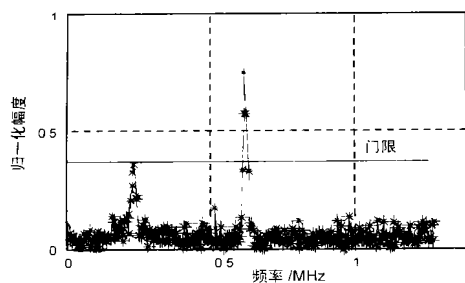


图 6 群时延影响

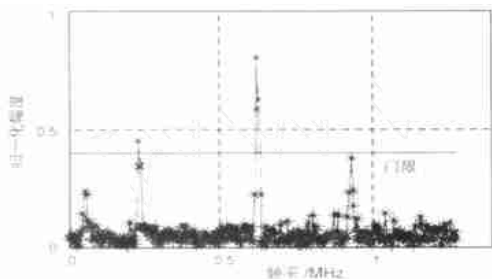


图 7 多径影响

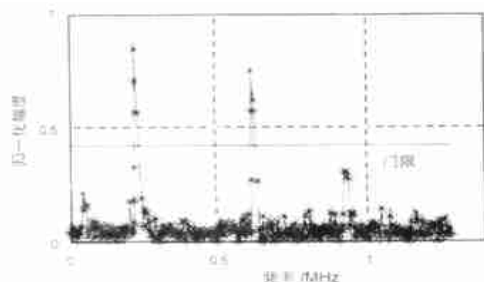


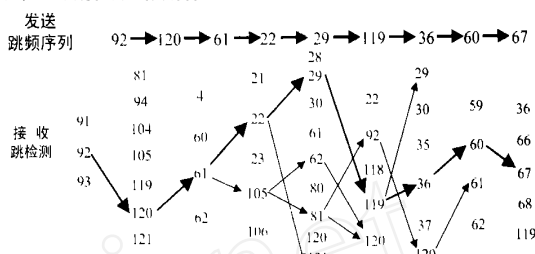
图 8 多径与群时延的综合影响

跳频率序列中某些相同的频率同时进入窗内,从而造成 Gauss 窗内最大幅度发生变化;

(4)从这 4 个图可知,虽然信道造成的影响非常复杂,但在这几种情况下,所需频率的幅度总大于 Gauss 窗内最大幅度的 $1/2$ 。也就是说,在一次 STFT 变换中,有用信号总能通过跳检测方法第 4 步的门限判决,虽然通过门限的频率不止一个。

以上这些结论说明,STFT 应用于跳检测可以很好地对跳频信号进行分析,再结合 G 函数的算法规律,对跳频率进行筛选、存储检测,进而寻找一条满足 G 函数算法规律的路径,即是所需检测的跳频率序列。 G 函数筛选频率、选择路径的过程如图 9 所示。在图 9 中,采用频率号 0~127 分别表示 10kHz~1280kHz 这 128 个频率,每一竖行的频率表示用 STFT 分析、检测到的每跳频率,箭头线表示路径前进的方向。从图 9 可看出,尽管由于短波信道多径、群时延等特性的影响,STFT 检测出的每跳频率不唯一,但利用 G 函数的映射规律,可以删除每跳不满足 G 函数算法规律的多余频点,并且经过几跳后,还删除了多余的路径,保留了一条符合 G 函数算法的路径,这即是所需要检测的频率序列,如图中粗线所示。一般通过 4~7 级缓存后,都能将有效的跳频率识别出来,而删除多余的

误跳,正确解调出数据。

图 9 G 函数频率筛选过程

6 结束语

跳检测是短波 DFH 系统的一个研究重点,本文在对短波 DFH 接收端信号进行深入研究的基础上,针对该信号在时间上不易同步,且一跳时间间隔内频率不唯一等特点,提出了基于 STFT 与 G 函数相结合的跳检测方法,仿真结果表明,检测效果良好,不失为实现短波高速 DFH 频率信号检测的一条好的途径。

参考文献:

- [1] David L Herrick, Paul K Lee. CHESSE-A new reliable high speed HF radio [J]. MILCOM '96, 1996, 10: 684 - 690.
- [2] 姚富强, 刘忠英. 短波高速跳频 CHESSE 电台 G 函数算法研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(5): 664 - 667.
- [3] 潘武, 周世东, 姚彦. 相关跳频通信系统的性能分析 [J]. 电子学报, 1999, 27(11A): 102 - 104.
- [4] 刘忠英, 姚富强. 短波 CHESSE 跳频系统的性能分析 [J]. 解放军理工大学学报自然科学版, 2000(5): 36 - 39.
- [5] 程正兴. 小波分析算法与应用 [M]. 西安市: 西安交通大学出版社, 1998.
- [6] 熊皓, 等. 无线电波传播 [M]. 北京市: 电子工业出版社, 2000.
- [7] 沈琪琪, 朱德生. 短波通信 [M]. 西安市: 西安交通大学出版社, 1989.

作者简介:



刘忠英 女, 1973 年 12 月生于湖北潜江县, 1998 年 2 月在解放军通信工程学院获工学硕士学位, 现为解放军理工大学博士研究生, 研究领域: 通信抗干扰、光纤通信。



张毅 男, 1974 年 3 月生于新疆阿克苏, 1995 年 7 月毕业于解放军通信工程学院无线工程系, 获学士学位, 2001 年 2 月于该院获硕士学位, 同年考入解放军理工大学攻读博士学位, 研究兴趣主要有通信抗干扰、数字通信等。