

文章编号:1001-893X(2010)08-0052-05

STFT 算法在短波差分跳频信号检测中的应用^{*}

熊俊俏

(武汉工程大学 电气信息学院,武汉 430073)

摘 要:结合短波差分跳频(DFH)信号的特点,分析了短波信道的多径、时延和多普勒效应对高速跳频信号的影响,构建了基于 Turbo 码的 G 函数模型,并提出采用短时傅里叶变换(STFT)算法和最大后验概率(MAP)译码算法相结合的跳检测方法,进行跳频信号的跳检测。仿真结果表明:综合考虑短波信道影响,采用该方法进行跳频信号检测,信噪比为 6.8 dB 时,误码率达到 10^{-5} ,可实现 DFH 信号的有效检测。

关键词:差分跳频;短波信道;短时傅里叶变换;跳检测

中图分类号:TN 911.23;TN914.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2010.08.011

HF DFH Hop – detection Method Based on STFT

XIONG Jun – qiao

(College of Electrical and Electronic Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: According to the characteristic of short – wave or HF(High Frequency) DFH(Differential Frequency Hopping) signal,the impact of the HF channel with multipath, delay and the Doppler on the high – speed FH signal is analysed,the G function model based on Turbo codes is established, and a new hop – detection method is proposed which combines with STFT(Short Time Fourier Transform) algorithm and maximum likelihood (MAP) decoding algorithm for detection of FH signals. The simulation results show that the bit error rate(BER) can reach 10^{-5} when the signal – to – noise ratio(SNR) is 6.8 dB,and the effective detection of DFH signal is realized.

Key words: differential frequency hopping(DFH);HF channel;short time Fourier transform(STFT);hop – detection

1 引 言

与传统的短波跳频体制相比,差分跳频(Differential Frequency Hopping,DFH)技术^[1]将编码、调制和跳频结合在一起,利用相邻跳频频率的相关性携带信息,提高系统的抗干扰能力。DFH 系统的跳速高达 5 000 跳/秒,短波信道对 DFH 信号和传统低速跳频信号的影响是不同的,文献[2]提出了基于短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transformation,STFT)与 G 函数相结合的跳检测方法,但仅开展了检测研究,

没有进行性能分析;文献[3]利用四阶累积量研究了高斯噪声下基于 ARMA 建模法的 DFH 信号频率检测,仅选择了高斯噪声信道;而文献[4]通过提取小波脊进行时频分析和参数估计的信号检测,但其运算量稍大;文献[5]则重点计算并分析了利用不同窗口函数跟踪跳频信号时的性能;文献[6]研究了基于卷积码模型的维特比硬判决和维特比软判决两种最大似然检测算法,并对在信道下的两种最大似然检测算法的性能进行研究。本文分析了短波信道对 DFH 信号的影响,基于 Turbo 码的 G 函数模型,采用

^{*} 收稿日期:2010-05-14;修回日期:2010-06-07

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划资助项目(D20091503)

Foundation Item:Hubei Province Education Department Science and Research Project(No.D20091503)

基于 STFT 和最大后验概率 (MAP) 译码算法相结合的跳检测方法,并进行了数值仿真。

2 短波差分跳频系统模型

短波差分跳频系统的结构如图 1 所示。G 函数为频率转移函数,若给定输入数据 X_N 和上一跳的频率 F_{N-1} ,则当前跳的频率 $F_N = G(F_{N-1}, X_N)$ 是输入数据 X_N 和上一跳频率 F_{N-1} 的函数。本文采用基于符号的 Turbo 编码^[7-9]实现 G 函数,采用 MAP 译码算法^[7-10]实现逆 G 函数。

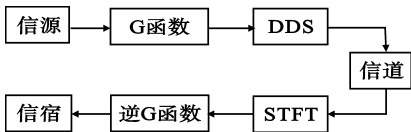


图 1 短波 DFH 系统模型
Fig.1 The model of HF DFH system

在发射端,Turbo 编码器采用两个基于符号的递归系统卷积码器并联而成,并在编码器后附加一个信道交织器,其目的是将突发错误离散成随机错误。然后,根据符号的十进制值直接进行射频频率映射,为了减小邻近频道干扰,结合脉冲赋形技术,采用直接数字合成(DDS)射频信号。接收端对接收到的跳频信号利用 STFT 算法进行解跳,得到各跳频频率的能量值,解交织后利用 MAP 算法进行逐符号译码,最后得到输出信息。本文所研究的系统指标如下:数据速率为 9.6 kbit/s,跳速为 5 000 跳/秒,数据的帧速率为 20 帧/秒;每帧数据包包含 250 跳,其中 240 跳用于传输数据,10 跳用于信道探测和同步;系统总带宽为 80 kHz,频率集包含 16 个频点。

3 短波信道对 DFH 信号的影响

短波电离层反射信道是一种时变色散信道,多径效应、群时延和多普勒效应是其主要特点。短波电离层传播的多径效应引起的信道时间色散,造成信道的频率选择性衰落,由相干带宽表征;电离层的多普勒效应引起的信道频率色散,造成时间选择性衰落,由相干时间表征^[11-12]。信号的持续时间和带宽不同,短波信道对信号的影响也不相同。

3.1 多径效应对 DFH 信号的影响

短波信道多径时延 95% 都集中在 0.5 ~ 4.5 ms 之间^[12],在传统低速跳频系统中,信号驻留时间长,

多径效应对本跳信号造成影响,使其幅度呈现瑞利衰落。然而,DFH 系统的跳速高达 5 000 跳/秒,每跳驻留时间只有 200 μ s,因此本跳信号幅度基本不受多径影响。

然而,跳信号经过多径时延后虽然不会出现在本跳驻留时间内,仍然会对其后的几跳信号造成干扰,导致一跳信号内存在多个频率的干扰信号^[12]。因此,可以将短波信道多径效应对 DFH 信号的影响看作是一种多频干扰。

3.2 群时延对 DFH 信号的影响

在短波信道中,沿同一路径传播的异频信号具有不同的传播速度,用群时延来表示相关跳频信号沿同一天波路径的传播时延。群时延造成相邻跳信号之间间隔不再等于一跳的时长,引起跳频信号的畸变^[10]。研究表明,短波信道的群时延为每兆赫几十微秒^[12],与 DFH 信号驻留时间相当。群时延使相邻跳信号发生了部分重叠,若重叠达到跳频脉冲宽度的一半以上,系统将无法区分信号,造成通信中断。因此对高速跳频系统而言,群时延会对系统性能造成严重影响。

3.3 多普勒效应对 DFH 信号的影响

短波信道相干时间约为 1 ~ 10 s^[12],DFH 信号每跳时长约为 200 μ s,远远小于信道相干时间,因此可以近似地认为信道是一个慢衰落信道,在一跳驻留时间内,信道的衰减和相移特性是非时变的。

综上所述,短波信道对 DFH 信号的影响与对传统低速跳频信号的影响是不同的。因此,本文将短波信道建模为加入群时延和多径干扰的加性高斯白噪声信道。

4 跳频信号的跳检测

根据上述关于短波信道对 DFH 信号影响的分析可知,由于短波信道的多径和群时延效应,任一跳频间隔内的频率信号受到多个频率成分的干扰。

短时傅里叶变换是一种时频分析方法,通过对信号加窗来分析信号在特定时间间隔内的频谱特性,因而可以用来分析一跳时间间隔内信号的频率特性。研究表明,高斯(Gauss)窗函数的时间-频率积满足 H 不等式下限,具有最好的时间、频率分辨率^[11],而且具有加强中心附近的信号以及抑制远离其中心位置信号的特点,对信号加窗后,可以抑制群时延造成的邻近跳信号频率以及多径造成的其它干

扰频率,降低这些信号的幅度。因此,采用高斯窗对跳信号进行 STFT 分析可以在一定程度上减少短波信道的不利影响。为了便于计算机实现,通常采用 STFT 的离散形式(DSTFT)。设抽样间隔为 T_S ,记 $x(n) = x(nT_S)$,可得到 DSTFT 形式如下:

$$\text{STFT}_x(m, \omega_k) = \sum_n x(n) g^*(n - mN) e^{-j\frac{\pi}{M}nk}$$

式中, N 为在时间轴上窗函数移动的步长, $g(n)$ 为离散形式的高斯窗函数。

本文 G 函数采用基于符号的 Turbo 编码方法实现,逆 G 函数采用 MAP 译码算法。文献[7]研究表明,MAP 算法是实现 Turbo 迭代译码最好的次最优算法。本文采用 STFT 与 MAP 译码算法相结合的跳频信号频率检测方法。

在接收端进行逐符号 MAP 译码实现逆 G 函数时,关键是确定网络图中分支转移概率值,根据文献[10]关于 M 元正交信号错误概率的相关理论可知,这些频点的能量值服从某些特定的分布。为确定该值,首先要得到由各频率能量值构成的某时刻能量矢量 $E_t = (E_{t,0}, E_{t,1}, \dots, E_{t,M-1})$,从而确定发送各频率的概率,再结合其它相关信息确定分支转移概率。

本文采用的跳频检测方法如下^[11-12]:假定系统已同步,对接收到的当前跳信号作 STFT,其窗函数采用高斯窗,而时间中心对应于当前跳信号的中心,然后将所得到的能量矢量送入 MAP 译码单元进行逐符号译码,然后移动窗函数对准下一跳信号中心,继续下一跳信号的跳检测。

5 仿真及结果分析

本文在 VC++ 6.0 编程环境下对 STFT 和 MAP 译码相结合的跳检测方法进行了数值仿真,分别验证了该方法在高斯信道和等效短波信道下的检测性能,并对分别存在多径干扰、群时延和多普勒效应的影响情况进行了仿真。

为了便于仿真,本文只考虑接收端经过下变频后的基带信号,并采用归一化解频率。接收信号经过采样后,每跳信号包含 $N = 32$ 个点。同时,高斯窗函数取归一化幅度值,窗长也相应选取为 32 个点。基于符号的 Turbo 编码器选取的 RSC 分量码生成多项为 $(51, 77)_8$,采用交织长度为 240 且满足 S 距离的模 K 交织器。仿真时,信道的群时延和多径时延时间均随机产生,其范围分别控制在 $0 \sim 100 \mu\text{s}$ 和 $0.5 \sim 3 \text{ ms}$ 。

图 2 是在 AWGN 下仿真所得跳频检测性能曲线,图中 4 条曲线分别代表 MAP 译码的迭代次数分别取 1、2、4、8 时的情况。如图所示,MAP 译码算法的迭代次数对译码性能有重要影响,随着迭代次数的增加,误码率明显减少,当信噪比为 0.2 dB 时,其误码率可达到 10^{-5} 。

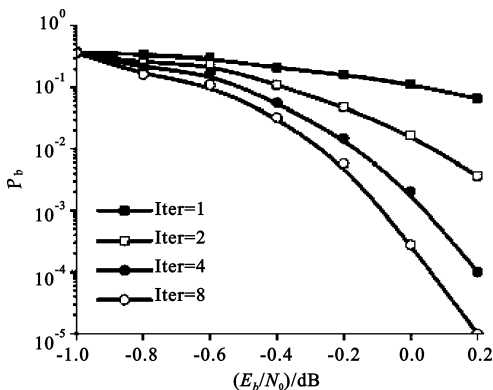


图 2 AWGN 信道下跳频信号检测性能
Fig.2 Detection performance of FH signal under AWGN channel

图 3 为考虑信道存在多径干扰情况时的跳检测性能曲线,仿真的多径传播路径数目分别取为 2 条和 3 条,当信噪比达到 6 dB 时,误码率降到 10^{-5} ,可见多径干扰对 DFH 信号的跳检测存在不利的影响。

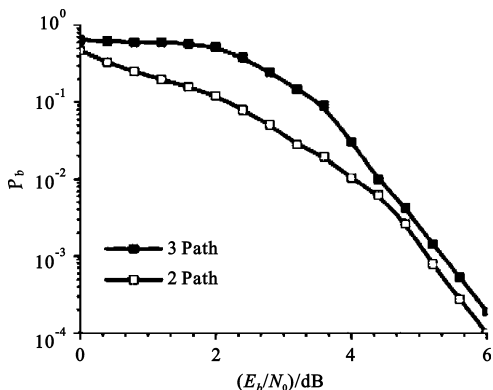


图 3 多径干扰时的跳信号检测性能
Fig.3 Detection performance for FH signal in presence of multipath interference

图 4 为是考虑信道存在群时延情况时的跳检测性能曲线,当信噪比达到 1.6 dB 时,采用 8 次迭代,系统误码率可降低到 10^{-6} 。

图 5 是考虑多普勒效应后跳检测性能曲线,与图 5 比较后可见,加入多普勒效应后,误码性能变化很小,仿真结果与上述关于短波信道对高速跳频信号影响的分析一致。

图 6 为综合考虑了多径干扰和群时延情况后的系统性能曲线,MAP 译码算法迭代次数为 1、2、4 和 8。由于同时考虑了多径和群时延的干扰,信噪比达到约 6.8 dB 时,迭代 8 次可使误码率降到 10^{-5} 。

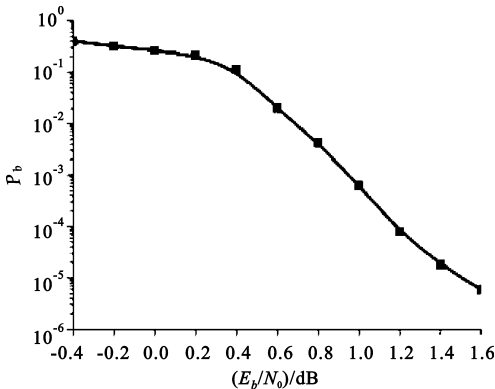


图 4 存在群时延时的跳检测性能
Fig. 4 Detection performance for FH signal in presence of group delay

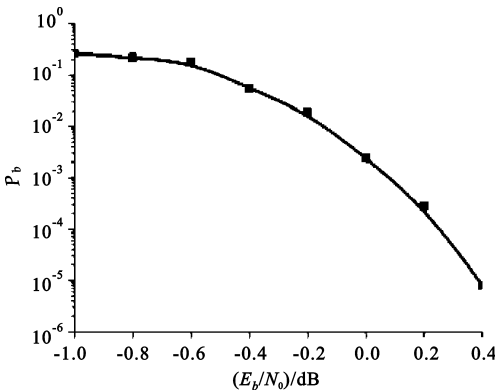


图 5 存在多普勒效应时的跳检测性能
Fig. 5 Detection performance for FH signal in presence of Doppler effect

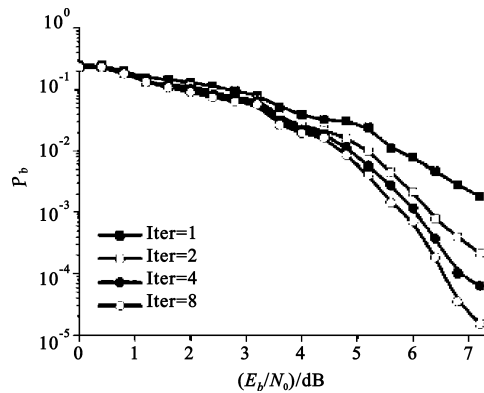


图 6 存在群时延和多径时的跳检测性能
Fig. 6 Detection performance in presence of group delay and multipath

仿真结果表明,短波信道的多径干扰和群时延对高速跳频信号存在重要影响,利用 STFT 和 MAP 译码算法对 DFH 信号进行跳检测可以得到较好的抗干扰性能。而且,STFT 可看作是加窗处理的傅里叶变换,因此也可采用快速算法,实现方法简便,特别适合 DFH 信号的检测。

6 结束语

跳频信号检测是差分跳频技术的关键部分,跳检测方法的性能对于 DFH 系统至关重要。本文首先分析了短波信道对 DFH 信号的影响,然后采用 STFT 与 MAP 译码算法相结合的方法对跳频信号进行检测。理论分析和仿真结果表明,短波信道多径干扰会对 DFH 信号造成多径干扰,其影响可看作是一种多频干扰;群时延会造成相邻跳 DFH 信号重叠,影响系统性能;而多普勒效应对信号的影响较小。与文献[6]相比,基于 Turbo 码建立的 G 函数模型,采用该方法进行跳频信号检测,在综合考虑短波信道影响后,信噪比为 6.8 dB 时,误码率可达到 10^{-5} ,可实现对 DFH 信号的有效检测,其性能远优于基于卷积码的 G 函数模型。

参考文献:

[1] Herrick D L, Lee P K. CHES: A new reliable high speed HF radio[C]//Proceedings of Military Communications Conference. McLean, VA USA: [s.n.], 1996: 684 – 690.

[2] 刘忠英,张毅,姚富强.基于 STFT 与 G 函数相结合的短波 DFH 跳检测方法[J].电子学报,2003 31(1): 13 – 16.

LIU Zhong – ying, ZHANG Yi, YAO Fu – qiang. HF DFH HOP – Detecting Method Based on STFT and G Function[J]. ACTA Electronic Sinica, 2003, 31(1): 13 – 16. (in Chinese)

[3] 隋丹,葛临东.高斯噪声下差分跳频信号的高分辨率频率检测[J].电讯技术,2005, 45(4): 79 – 82.

SUI Dan, GE Lin – dong. High Resolution Frequency Estimation of Differential Frequency Hopping Signal in Gaussian Noise [J]. Telecommunication Engineering, 2005, 45(4): 79 – 82. (in Chinese)

[4] 王明海,苟彦新,田岩.一种基于小波脊时频分析的差分跳频信号检测方法[J].电讯技术,2008, 48(3): 86 – 90.

WANG Ming – hai, GOU Yan – xin, TIAN Yan. A Differential Frequency Hopping (DFH) Signal Detection Method Based on Wavelet Transform and Time – frequency Analysis [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(3): 86 – 90. (in Chinese)

- [5] 许红军,柯建波,党百振.跳频信号的 STFT 时 - 频分析[J].桂林电子工业学院学报,1998 18(1):15 - 19.
XU Hong - jun, KE Jian - bo, DANG Bai - zhen. The STFT Time - frequency Analysis of FH - SS Signal[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 1998, 18(1): 15 - 19. (in Chinese)
- [6] 董彬虹,李少谦,陈智,等.差分跳频信号最佳接收机设计[J].电子科技大学学报,2003,32(5):530 - 534.
DONG Bin - hong, LI Shao - qian, CHEN Zhi, et al. Design of Optium Receiver for DFH signal[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2003, 32(5): 530 - 534. (in Chinese)
- [7] 刘东华. Turbo 码原理与应用技术[M].北京:电子工业出版社,2004:72 - 98.
LIU Dong - hua. Principle and Application of Turbo Code [M]. Beijing: Publishing House of Electrnics Industry, 2004: 72 - 98. (in Chinese)
- [8] Bingeman M, Khandani A K. Symbol - based Turbo Codes [J]. Communications Letters, 1999 3(10): 285 - 288.
- [9] J Yuan, W Feng, B Vucetic. Turbo trellis coded modulation for fading channels[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. [S. l.]: IEEE, 2000: 2059 - 2063.
- [10] John G Proakis. Digital communications [M]. 4th ed. USA: McGRaw - Hill Companies, Inc, 2000: 814 - 887.
- [11] 王亚军,张玉,解明祥.短波电离层反射信道模型的建

立与仿真[J].电波科学学报,2004,19(3):357 - 361.

WANG Ya - ium, ZHANG Yu, XU Ming - xiang. Model ing and simulation of short - wave ionospheric radio channel [J]. Chinese Journal of Rradio Science, 2004 19(3): 357 - 361. (in Chinese)

- [12] 胡中豫.现代短波通信[M].北京:国防工业出版社,2003:91 - 98.

HU Zhong - yu. Modern Short - wave Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 91 - 98. (in Chinese)

作者简介:

熊俊俏(1966 -),男,湖北天门人,副教授,1988 年和 1995 年先后于江汉石油学院和武汉大学获学士和硕士学位,1988 年至 2006 年在江汉石油学院工作,自 2006 年在武汉工程大学电气信息学院工作,目前的研究方向为无线通信和智能仪表开发。

XIONG Jun-qiao was born in Tianmen, Hubei Province, in 1966. He received the B. S. degree from Jiangnan Petroleum Institute and the M. S. degree from Wuhan University in 1988 and 1995, respectively. He has been working with Jiangnan Petroleum Institute from 1988 to 2006. Since 2006, he has been with Wuhan Institute of Technology, where he is an associate professor in the College of Electrical and Electronic Engineering. His current research interests include wireless communications and intelligent instrument.

Email: xiongjunqiao@sina. com