多相滤波器在跳频解调中的应用

焦东立，彭　浪，付林罡

(北京遥测技术研究所，北京 100076)

摘要：本文针对全数字多载波跳频接收机提出一种高效的解调算法，首先，跳频技术因其具有良好的抗干扰性能，在军事通信中有着广泛的应用，本文在跳频接收机下采样的处理中，添加一组下采样滤波器组，用于跳频信号的解调，该算法较于以往的算法，复杂度较低，便于实现；且该算法采用的是并行捕获，可以实现信号的快速捕获，降低同步时间；解调后，第二组滤波器组用于实现 MFSK 调制信号的非相关解调，进一步降低解调端的复杂度。

关键词：跳频；抗干扰；多载波跳频；多相滤波器组

中图分类号：TN914.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-3096(2018)01-0028-04

DOI: 10.11759/hykx20171011017

海面观测组网通信设备、无人艇/无人机观测系统等海洋监测技术产品所构成的无线传感器网络与无线自组织网络协同作业观测系统，日益重要，以致目前海上船只间的组网技术受到了广泛关注，然而系统组网要靠物理层的通信来保证，特别是海上执法时，往往会受到各种干扰，而对抗这些干扰有效的方法，就是在物理层中采用具有抗干扰作用的调制方式，其主要的一种技术就是跳扩频技术。

跳扩频技术是一种在收发两端发送已知的随机序列，且两端的载波频率不停地切换，由于其抗干扰性能[1]，被广泛的应用于军事通信中；同时在民用通用中也有着广泛的应用，如蓝牙的IEEE 802.15.1[2]，广域网 IEEE 802.11[3]。

在跳频系统中，载波分集技术通过快速跳频来实现，即跳频周期小于信号的符号周期[4]，如文献[4]中 12.7.4 中所述，为了克服信道延迟扩展大于一个码片周期的情况，单纯的扩频技术只有和跳频技术结合起来才能达到这种效果。但是跳频系统的实现有两个主要的问题，首先是该系统要求高速的跳频和解跳实现电路，其性能受限于硬件的时钟频率和钟的抖动性能；其次，在高速跳频的情况下，PN 序列的捕获和跟踪实现起来就很困难。

Lance 等[5]首先提出一种多载波的跳频系统模型，并给出在存在干扰时系统的误码性能，Shin 等[6]提出一种 MCFH(multicarrier frequency hopping)跳频解调架构，该算法可以更好的抑制信道的时延扩展，同时其分集增益也比传统算法要高，在快变信道下的解调性能也很具有优势，目前已经将 MCFH 用于多址通信。

Chen 等[7]提出一种基于多相滤波器的全数字跳频系统，该文献指出在解调的过程中，通过多相滤波器对 PN 进行并行捕获，可以很好的降低捕获时间，该多相滤波器组具体的实现方法参考文献[8]。

本为针对 MCFH 的系统架构，基于多相滤波器的算法，给出一种新的跳频解调架构，首先给出传统的跳频系统架构及 MCFH 系统架构，其次介绍基于多相滤波器组的 MCFH 解调算法，然后给出其仿真结果，并与文献[7]结果进行对比，最后给出结论。

1　传统跳频及 MCFH 系统架构

传统的跳频系统的调制解调如图 1 所示，MFSK 调制信号进过一个由 PN 序列控制的载波发生器，来实现信号的跳频系统，在接收端首先对信号进行解调，再进行对 MFSK 信号进行解调，为了简化 MFSK 的解调实现算法，本文采用参考文献中[4]的非相干解调算法，在对 MFSK 信号进行带同滤波后，采用平方法的包络检波器。为了获得频率的分级增益及对抗信道的时延扩展，在系统中采用跳频方法。首先要解决跳频及解调的实现电路，及伪码的跟踪和捕获。

MCFH 系统框架如下图 2 所示，在发射端 MCFH 系统包含 L 个跳频电路，调制相同的 MFSK 信号在不同的载波上。由于调制相同的 MFSK 信号，跳频

收稿日期：2017-10-11；修回日期：2017-12-02

作者简介：焦东立(1983-)，男，河南濮阳人，硕士研究生，主要从事无线通信及数据链产品研究，电话：15010036198，E-mail：857542418@qq.com

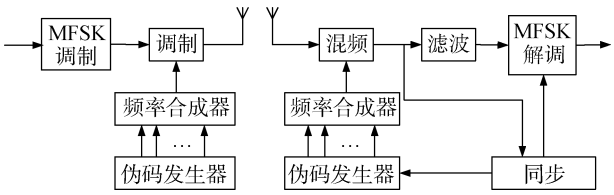

图 1　跳扩频解调系统框图

Fig. 1　Hopping spread spectrum demodulation system block Figure

周期可以等于 MFSK 信号的符号周期以获得频率的分集增益。本文中的跳频周期等于 MFSK 信号的符号周期，同时，在 L 跳频点上的 PN 序列为正交的 PN 码，相同的 MFSK 调制信息被传输 L 次，且出现在不同的载波点上；如果选择的 PN 序列不正交，信号的符号间将会产生相互的干扰。由于每路信号的载波频率不一样，因此其相互干扰可以避免，只是降低频率的分集增益。

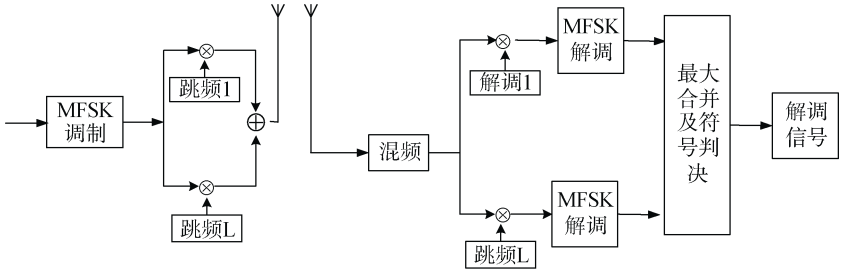

图 2　基于多载波系统的跳扩频调制及解调框图

Fig. 2　Jump spread spectrum modulation and demodulation block diagram based on multi carrier system

MCFH 系统的接收框架，包含 L 个独立的解跳电路，且每路解调信号后紧跟着独立的 MFSK 解调模块，然后将信号送到合并模块，获得信号的分集增益，并对解调信号进行判别。

在 MCFH 系统中可以看出在发送和接收端要求高速的跳频及解调实现电路，且在每跳的解调模块中要求独立的 PN 码的捕获和跟踪；并且 MFSK 信号的解调要求一个带同的滤波器组，增加了系统解调的运算量，同时在接收端的 PN 同步上也只能采用串行捕获的方法，增加了系统的捕获时间[4]。

2　基于多载波跳频系统的多相滤波器设计

由图 1 可以看出，调制的 PN 码直接调制在不同载波频点上，同时要求一个并行的带同滤波器组做为 MFSK 解调器。上述设计都可以通过数字端进行实现，但是直接仿照模拟的调制来做的话，会给系统的设计带来巨大的运算量，因此本文给出一中基于多相滤波器的 MCFH 接收算法。

多相滤波器组是一种高效的带通滤波器组实现方法，其实现框图包含 M 条径，其实现框图见图 3，其中 $E_i(Z), i=0,1,\cdots,M-1$，代表 M 条多相滤波器的低通滤波器。其实现架构参考文献[8]。其通过抽取滤波器避免了高速信号电路的设计，$M/2$ 到 1 的下采样速率。

通过对多相滤波器参数合理的配置，可以使得其达到解调的功能，并完成 PN 的捕获及跟踪，Chen 等[7]通过早迟门的方法实现了解跳及伪码同步，解

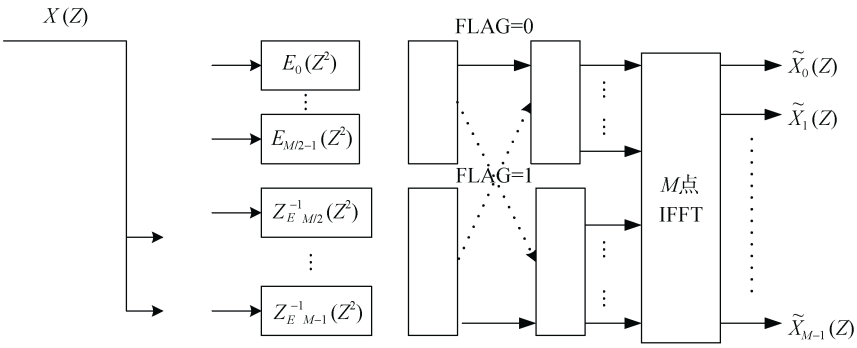

图 3　多相滤波器组设计方法

Fig. 3　Design method of multiphase filter bank

调是通过 PN 码的累加，通过与已知的 N 种结果比较，达到解跳的目的，其实现框图见图 4，采用多相滤波器组进行解调的电路具有以下优点，避免了模拟的混频解调，增加了 PN 码捕获和跟踪的精度，采用了并行捕获，降低了捕获的时间[4]。

另外多相滤波器组同样可以实现带同滤波器的 MFSK 信号的解调，其实现框图参见图 4，同样可以避免采用高速的时钟来处理带同滤波器。

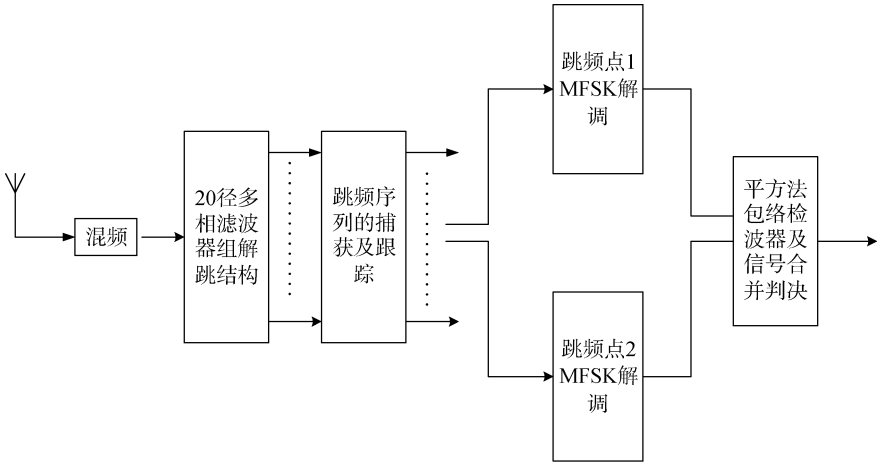

图 4　基于多相滤波器的多载波跳频解调框图

Fig. 4　Multi carrier frequency hopping demodulation block diagram based on multiphase filter

3　仿真结果

仿真系统采用两条分集路径的多载波跳频系统。包含 16 个跳频频率，从-6MHz 到+6MHz，其步进为 800kHz，800kHz 为 MFSK 调制信号的调制带宽。本文采用 8FSK。

输入信号进过 20 路的解跳多相滤波器组，其采样率为 16MHz，因此其信道间隔为 16MHz/20=800KHz，将文献[8]中的滤波器设计为 20/2∶1，其解跳模块中的 8FSK 信号的采样率为 1.6MHz，是 8FSK 信号带宽的 2 倍。其后面紧跟一个 20 径的多相滤波器组，完成 8FSK 调制信号的解调，其信号的间隔为 1.6MHz/20=80kHz，其为 8FSK 信号的调制间隔。图 5 表示了串行传输的多载波跳频信号。其分集性能为每个调制信号通过两个载波进行调制，然后进行最大合并，得到新号的解调的分集增益。

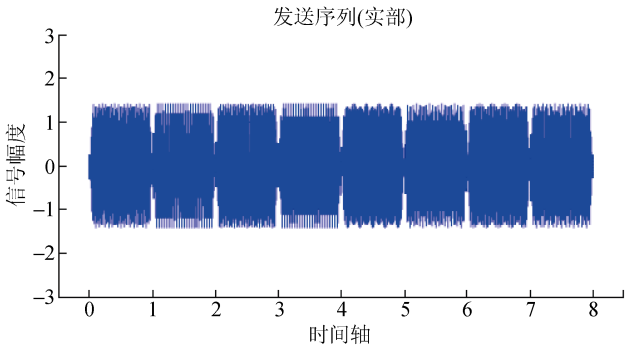

图 5　跳频的时域信号波形

Fig. 5　Time domain signal waveform of frequency hopping

图 6 表示 20 条多相滤波器组跳频时间，由于采用了分集的方法，可以看到在每个符号周期中在两个不同的载波上可以看到相同的调制信息，为了验证给出的接收机的系统性能，本文在瑞利衰落信道下给出系统的误码率仿真，即每个载波都进过了瑞利衰落信道，其信道的时延扩展本文并没有考虑。其仿真结构参考图 6，通过和理论的 8FSK 信号的解调相对比，可以看到多载波跳频系统的解调性能和理论值相接近，验证了本文提出的算法的系统性能。

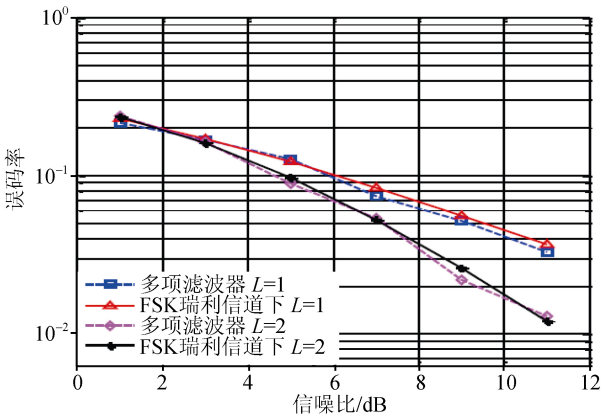

图 6　多相滤波器组的解调性能与理论性能对比

Fig. 6　Comparison of demodulation performance and theoretical performance of multiphase filter banks

其解调模块为20径的 $M/2$ ：1的多相滤波器组，其实现的滤波器阶数为 200 阶，通带为 0~300kHz，阻带为 500~8MHz, 60dB 的阻带衰减。通过上述结果可以看出，本文提出的算法在跳扩频系统下的解调性能接近于理论的 FSK 调制，但是较传统的 FSK 调制又具备较好的抗干扰性能。

4 结论

本文提出了一种可实现的多载波跳频解调算法，该算法通过多相滤波器组实现信号的解跳功能，避免了传统算法中采用高速钟来解调带来的复杂度，并通过并行捕获缩短了 PN 码的捕获时间。另外通过多相滤波器组实现了 MFSK 信号的非相干解调，降低的算法计算的复杂度。并通过仿真结果验证了该算法的解调性能。

参考文献:

[1] Y.T.Su and L. der Jeng, “Antijam capability analysis of RS-coded slow frequency-hopped system ”, IEEE Trans. Commun , 2000, 1(48): 270-281.

[2] Bluetooth SIG, Bluetooth Core Specification, Nov.2003. http: //www.bluetooth.com.

[3] IEEE Std 802.11-1999, Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer specifications[N], Reaffirmed on June 12, 2003.

[4] Sklar B.“Digital Communications fundamentals and Applications”, second edtion prentice Hall, Upper Saddle River[J]. New Jersey, 2003, 7: 45-48.

[5] Lance E, Kalech G K.“A Diversity Scheme for a Phase-Coherent frequency-Hopping spread spectrum systems”[J]. IEEE Trans. on Commun, 1997, l(45): 1123-1129.

[6] Shin O S, Lee K B. “Performance comparison of FFH and MCFH spread –spectrum systems with optimum diversity combing in frequency-selective Rayleigh fading channels”[J]. IEEE Trans Commun, 2001, l(49): 409-416.

[7] Chen X. harris F, Venosa E. “Polyphase Channelizers for fully digital frequency Hopping systems”[J]. Analog Integrated Circuits and Signal processing, 2004, 73(issue 2): 968-981.

[8] Chen X, harris f, Venosa E, et al. “Non-maximally decimated analysis /synthesis filter banks: Applications in wideband digital filtering”[J]. IEEE Trans Signal Process, 2014, l(62): 4, 852-867.

Application of a multiphase filter in frequency hopping demodulation

JIAO Dong-li, PENG Lang, FU Lin-gang

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Received: Oct.11, 2017

Key words: frequency hopping; anti-jamming; multicarrier frequency hopping; multiphase filter group

Abstract: This paper presents an efficient demodulation algorithm for all digital multicarrier FH receivers. Frequency-hopping technology has been widely used in military communication because of its good anti-interference performance. In this paper, a filter group, namely a multiphase filter group, is added under the commonly used frequency-hopping receivers. For frequency-hopping signal demodulation, the proposed algorithm is less complex and easier to implement than previously used algorithms. This algorithm adopts parallel capture, which can realize fast acquisition of signals and reduce synchronization time. After Demodulation, the second group of filters is used to realize the MFSK modulation signal's non-correlation demodulation, thereby further reducing the demodulation end-signal complexity.

(本文编辑：梁德海)