

Link - 16 信号的盲检测接收方案设计

张东伟, 郭 英, 霍文俊, 齐子森, 张 波

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要 设计有效的高速跳频检测接收方案是 Link - 16 信号检测接收的基础, 基于多通道辐射计架构给出了一种 Link - 16 信号的跳频检测接收方法。通过详细分析 Link - 16 的通信体制及其信号的高速跳频特性, 针对直接将多通道辐射计引入 Link - 16 信号检测存在的不足, 设计了新的自适应门限算法和判决规则, 提出了简单可行的通道检测结果修正准则, 最终实现了基于多通道辐射计的 Link - 16 信号检测接收。仿真结果表明: 该检测方案的门限算法对信号幅度有较强的适应能力, 使得通道判决结果不受背景噪声影响, 在低信噪比条件下, 可有效地解决 Link - 16 信号检测问题, 从而验证了本方案的有效性。

关键词 Link - 16; 联合战术信息分发系统; 信号盲检测; 信道化; 自适应门限

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.014

中图分类号 TN914.4 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0063-05

Link - 16 是美国各军种和北约国家通用的重要战术数据链。它实现了战术数据链从单一军种到军种通用的一次跃升, 被美国国防部确定为 C⁴ISR 系统及武器系统中的主要综合数据链。对 Link - 16 信号进行有效的盲检测是对其进行后续分析处理及对端机实施干扰的前提。Link - 16 的终端为联合战术信息分发系统(Joint Tactical Information Distribution System, JTIDS)和多功能信息分发系统(Multifunctional Information Distribution System, MIDS), 本文针对 JTIDS 信号的盲检测设计了一种基于多通道辐射计架构的检测接收方案并对该方案的检测性能进行了评估。

1 Link - 16 通信体制

JTIDS 是一种采用时分多址接入方式的数据广播网络, 它把时间轴依次划分成时元、时帧、时隙。每个时隙的长度为 7.812 5 ms, JTIDS 单元(JTIDS Unit, JU)在系统分配给自己的时隙内将需发送的信息按照预定的时隙结构进行封装, 然后发送。JTIDS 共有 3 种可选的通信模式。JTIDS 信号是一种典型的直扩/跳频混合信号, 因此, 检测 JTIDS 信号面临很大的技术困难。要实现 JTIDS 信号真正的盲检测需要解决 2 个技术难题: 一是高速跳频信号的截获, 二是直接扩频信号的检测(参数估计)。

2 Link - 16 信号盲检测

关于 JTIDS 信号检测, 目前主要有 2 类方法: 一类是假定已利用信道化接收机完成对 JTIDS 信号的接收, 将各频点下变频到统一的中频进行分析。通过将截获信号的参数估计结果同 JTIDS 信号的公开指标(如码速率)进行比对实现信号检测, 比较典型的有延时相乘及其改进型延时相乘 - 分段相关检测法^[2]、平方率检测法^[3]、二次功率谱检测法等^[3]。二是利用跳频检测算法实现 JTIDS 信号检测, 比较典型的是基于多跳自

* 收稿日期: 2011-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971100); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2010JM8037; 2010JQ8003)

作者简介: 张东伟(1987-), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事通信信号处理研究. E-mail: zdw_dsp616@163.com

相关^[4]的方法。第 1 类方法直接跳过了跳频检测环节,因此无法实现盲检测。要实现对 JTIDS 信号真正的盲检测,需要设计针对其高速跳频特性的检测方案。多跳自相关检测法性能优良,但该算法对单跳信号的信噪比变化敏感,并且不能完全保存截获的 JTIDS 信号技术参数,因此不便于后续处理。在跳频信号的各类检测方法中,基于信道化接收的检测方法运用了并行接收机理,检测性能优良、实时性好,且可保存和提取信号的全部技术参数,适合 JTIDS 信号的高速跳频特性对检测算法实时性和后续处理的要求。最具代表性的信道化检测方法^[5]有多通道辐射计检测法、基于 DFT 谱分析的检测法和信道化自相关检测法。文献[6]提出了多通道辐射计跳频检测方法,该方法是一种能量检测法,能够在包含大量干扰的环境中达到近似白噪声环境中的性能。文献[6]还分析了时间不同步和频率偏移对检测性能的影响,同时给出了解决方法。文献[7]研究了应用辐射计时部分带宽检测接收机的性能,得出了一些对工程实践具有指导意义的结论。文献[8]针对慢速跳频系统,对基于多通道辐射计的最大化软判决接收机的性能进行了分析。可见,在信道化检测方法中,多通道辐射计检测法性能优良,计算量较小,并具备时间失步容忍能力,所以优先选用多通道辐射计实现 JTIDS 信号检测。

2.1 基于多通道辐射计的跳频检测算法

如图 2 所示:接收机由 N 个(其值等于频点数目)并行工作的辐射计组成,记为 $\{chi; i = 1, 2, \dots, N\}$ 。各通道的 BPF 带宽均为 W_i ,能量积分周期为 T_i (以下简称积分周期), N_i 为观测时间 T 同积分周期 T_i 的比值,即观测次数, β 称为定频或突发干扰门限。

检测原理为:各通道在每一个积分周期 T_i 内测量本通道的信号能量,第 k 次测量结果记为 $\{E_{i,k}; i = 1, 2, \dots, N\}$, $E_{i,k}$ 同自适应门限 $\{\alpha_{i,k}; i = 1, 2, \dots, N\}$ 进行比较生成各积分周期判决逻辑量 $\{d_{i,k}; i = 1, 2, \dots, N\}$,若 $E_{i,k} \geq \alpha_{i,k}$, $d_{i,k}$ 取 1,反之 $d_{i,k}$ 取 0。文献[6]中自适应门限 $\alpha_{i,k}$ 的计算规则为:

$$\alpha_{i,k} = M \sum_{j=1}^{WL} a_j E_{i,k-j} \quad (1)$$

式中: M 为比例因子; $\{a_j; j = 1, 2, \dots, WL\}$ 为加权系数。各通道在 T 期间对 $d_{i,k}$ 进行 N_i 次累加生成各通道检验统计量 $\{S_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ 。若 S_i 为 0,表示 chi 内未检测到跳频信号,单通道判决结果 D_i 取为 0;若 $1 \leq S_i \leq \beta$, D_i 取为 1,表示 chi 有跳频信号出现。若 $\beta + 1 \leq S_i \leq N_i$,则认为该通道出现了定频信号或突变干扰,这是因为正常的跳频信号不会长时间驻留在同一频点上,统计意义上,跳频信号在各通道上出现的次数满足均匀分布,因此观测时间 T 内 β 的取值应该是较小的。最后对通道判决逻辑量 $\{D_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ 求和生成总体检验统计量 S , S 同总体判决门限 L 进行比较,若 $S \geq L$,判为存在跳频信号,否则判为无信号。

称 k 之前临近的 WL 个积分周期的信号能量为门限函数集。按照式(1)判决的实质为: i 通道上第 k 跳的信号能量 $\{E_{i,k}; i = 1, 2, \dots, N\}$ 与门限函数集中元素的加权平均值进行比较产生 i 通道第 k 跳的判决结果 $\{d_{i,k}; i = 1, 2, \dots, N\}$ 。因此,可将 WL 理解为式(1)的门限更新周期,若某频点两次被跳到的时间间隔小于 WL ,对于该频点的接收通道而言,由于第 1 跳信号被记入了门限函数集,门限已被抬高,此时第 2 跳信号很容易漏检,两跳之间间隔越近,第 2 跳漏检的概率越大。可见,若直接将多通道辐射计应用于 JTIDS 信号检测,会出现以下 3 点问题:①若通道上出现两跳 JTIDS 信号(可以来自不同端机)且后一跳的幅度相比于前一跳很小时,式(1)的门限算法难以截获该跳小幅度信号,同时该跳的能量被记入门限函数集中取代最早的元素,容易导致持续的漏检。②当 Link-16 工作于多网结构时,多个端机可能在同一个时隙内发送信号。因此,接收机某通道连续检测到有跳频信号的时间间隔没有统计规律,此时很容易造成在出现同一频点的连续两跳后的持续漏检。③通信模式 2 的 Link-16 信号为定频传输,若利用式(1)进行判决,门限值被持续抬高,在门限上升期会检测到若干次信号,该次数很容易满足单通道的判“1”条件,从而误判为通信模式 1。针对以上 3 个问题,本文对式(1)门限算法进行改进,使其适合于 JTIDS 信号特点。

2.2 改进的自适应门限算法及判决规则

针对 JTIDS 信号特点,门限算法应该满足以下要求:一是在低信噪比时检测性能优良(-2 dB 时检测概率大于 0.95);二是能够自适应更新,从而能够实时跟踪目标信号强度;三是计算简单。

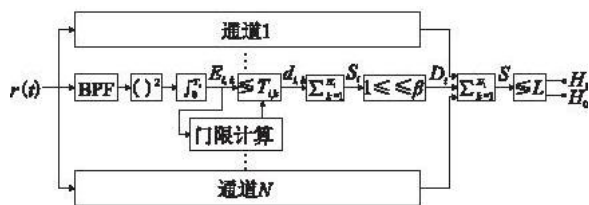


图 2 多通道电磁辐射计跳频信号检测接收机

Fig. 2 Multichannel radiometer FH detection receiver

基于以上考虑,本文采用双门限方案,设定 2 个具有不同优先级的自适应门限 $T_{i,k}$ 、 $T'_{i,k}$ 。 $T_{i,k}$ 主要用于实时跟踪接收信号的强度,进行第一次判决; $T'_{i,k}$ 用于对 $T_{i,k}$ 判决漏检的信号进行二次判决。工作流程为:当 $E_{i,k}$ 与 $T_{i,k}$ 进行二元判决的结果 $d_{i,k}$ 为“1”时,存储结果;若 $E_{i,k} < T_{i,k}$, $E_{i,k}$ 再与 $T'_{i,k}$ 进行比较,若 $E_{i,k} \geq T'_{i,k}$, 代表此时在某通道上出现了相邻积分周期的目标跳频信号幅度由大变小的情况,利用 $T_{i,k}$ 判决造成了小信号的漏检,应将 $d_{i,k}$ 置为“1”;若 $E_{i,k} < T'_{i,k}$, $d_{i,k}$ 为“0”。

门限 $T_{i,k}$ 和 $T'_{i,k}$ 的计算方法为式(2)、(3):

$$T_{i,k} = A(\bar{E}_{i,k-1} + E_{i,k}/WL) \quad (2)$$

式中 A 为比例因子。

$$T'_{i,k} = \alpha A E'_{i,k-1} \quad (3)$$

式中 α 为修正比例因子。设 $\bar{E}_{i,k}$ 为能量均值, $E'_{i,k}$ 为能量修正值, a_j 为加权系数, $d_{i,k}$ 为二元判决结果, 其计算方法如下:

$$\bar{E}_{i,k} = \sum_{j=1}^{WL} a_j E'_{i,k+1-j} \quad (4)$$

$$a_j = u(WL - k) \frac{1}{k} + u(k - WL - 1) \frac{1}{WL} \quad (5)$$

式中 $u(k)$ 为单位阶跃序列。

$$E'_{i,k} = \begin{cases} E_{i,k} & \text{if } d_{i,k} = 0 \\ \bar{E}_{i,k-1} + E_{i,k}/WL & \text{if } d_{i,k} = 1 \end{cases} \quad (6) \quad d_{i,k} = \begin{cases} 0 & \text{if } E_{i,k} < T_{i,k} \text{ (or } T'_{i,k}) \\ 1 & \text{if } E_{i,k} \geq T_{i,k} \text{ (or } T'_{i,k}) \end{cases} \quad (7)$$

称第 k 个积分周期之前临近的 WL 个能量修正值 $E'_{i,k}$ 构成 $T_{i,k}$ 的门限函数集。由式(2)、(4)、(6)、(7)可见, $T_{i,k}$ 由门限函数集中的元素与能量值 $E_{i,k}$ 加权生成, 能量值与门限值判决生成本积分周期的判决结果后, 依据判决结果生成本积分周期的能量修正值。为了使能量修正值能实时跟踪噪声的变化(始终跟踪最临近本积分周期且可测的噪声能量), 能量修正值的更新规则为: 当能量值小于门限时, 认为是噪声, 能量修正值等于本积分周期的能量值; 当能量值大于门限时, 认为是信号, 此时回溯本积分周期之前临近的判决结果, 直至出现判为噪声的积分周期停止, 再将将该积分周期所对应的门限函数集中元素的均值连同本积分周期能量的加权值赋给能量修正值。生成本积分周期的能量修正值后, 更新门限函数集, 依此类推。

因此, 采用本文的自适应门限算法, 本质上是使判决门限实时跟踪背景噪声的变化, 并将截获的信号状态实时反映到门限调整, 从而保证了判决门限自适应地跟踪目标信号及环境噪声干扰的变化, 最大限度地减少漏检发生。

3 实验仿真及结果分析

积分周期 T_1 设为 JTIDS 信号的半个跳周期, 即 $6.5 \mu\text{s}$, 采样率设为 200 MHz 。生成通信模式 1 的 JTIDS 信号时, 用 M 序列控制载频变化, 并对生成的载频索引值进行宽间隔化处理, 使相邻脉冲的频点间隔大于或等于 30 MHz , 组帧时, 依据图 1 在数据段前、后端分别加上随机的抖动时间。将载频固定即可生成通信模式 2 的 JTIDS 信号。模式 1 的 JTIDS 信号及其在 -5 dB 信噪比时的波形如图 3 所示。

实验 1: 改进的自适应门限算法对目标信号幅度的适应能力

将模式 2 的 JTIDS 信号通过检测接收机, 观察 ch1 的滤波器输出波形及门限同步跟踪情况以检验接收机对信号幅度的适应能力, 结果如图 4 所示。图 4 所示的信号幅度变化模拟了实际中最苛刻的情况。可见, 判决门限随着信号的幅度变化, 在目标信号出现时刻, 积分器输出值始终在门限值上方, 证明门限算法能够很好地适应目标信号的幅度变化。

实验 2: 自适应门限算法对背景噪声的适应能力

定义噪声功率为相对于归一化信号功率的分贝值, 不加 JTIDS 信号, 侦察接收机的总体频点门限 L 取 2, 接收机底噪功率从 0 dB 变化到 8 dB 时各进行 1 000 次 Monte - Carlo 实验统计虚警概率以研究通道噪声对虚警的影响。仿真结果为: 1 000 次仿真实验出现虚警的次数为 0。图 5 是底噪功率分别为 5 dB 、 8 dB 时在第 4 通道上某次实验的自适应门限同积分器输出值的同步跟踪关系。可见, 判决门限随着噪声能量值的变化而波动, 但其值始终大于噪声能量, 没有引起虚警。因此在平稳噪声条件下, 改进的门限算法能够使各通

道的判决结果不受背景噪声影响。如上文所述,改进的自适应门限可以显著提高判决门限对噪声能量起伏的适应性,保证在噪声段的判决门限始终位于噪声能量值之上。

实验3:比较多跳自相关和多通道辐射计对 JTIDS 信号的检测性能

多跳自相关检测法的虚警概率设为 10^{-3} ,多通道辐射计的总判决 L 取 13,在不同信噪比下各进行 10^5 次 Monte - Carlo 实验,2 种检测算法对模式 1 的 JTIDS 信号检测性能见图 6。可以看出,采用本文给出的门限算法,多通道辐射计对 JTIDS 信号的检测性能优于多跳自相关方法。若以检测概率大于 0.9 作为检测指标,多通道辐射计在信噪比大于 -6dB 时可实现对目标信号的有效检测。由于各通道判决结果的综合值 S 表征在观测时间内出现目标信号的频点数,总体门限 L 代表确认检测结果对频点数提出的要求,多通道辐射计检测方法的检验统计量为短时能量,因此为了尽量降低虚警概率, L 应取较大的值。JTIDS 信号有 51 个频点,当 1/4 以上的频点均被遍历时,判定出现了目标信号,因此选用 L 取 13 时(远远大于文献[6]中 L 的取法)的检测概率衡量检测接收机性能是合适的。

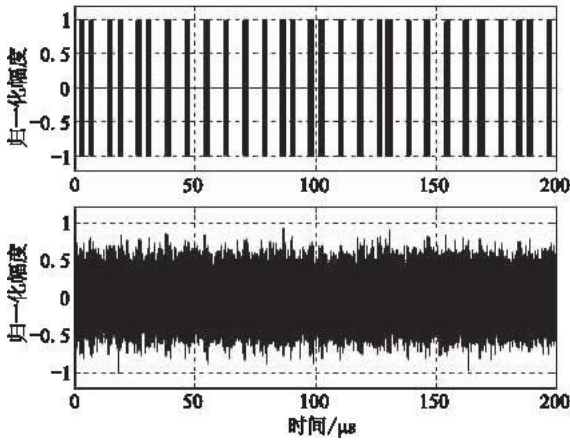


图3 模式 1 的 JTIDS 波形

Fig.3 The mode I JTIDS wave

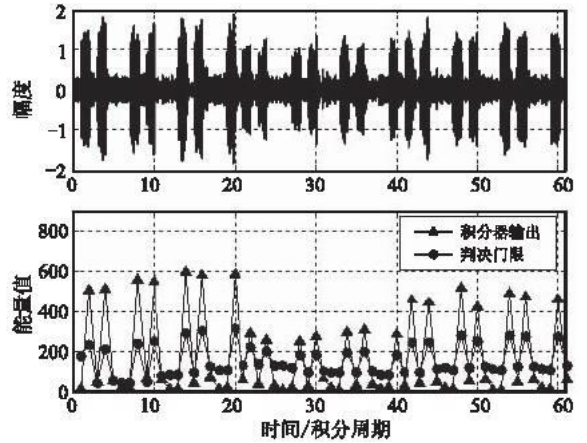


图4 模式 2 的 JTIDS 波形及门限跟踪

Fig.4 The mode II JTIDS wave and threshold trace

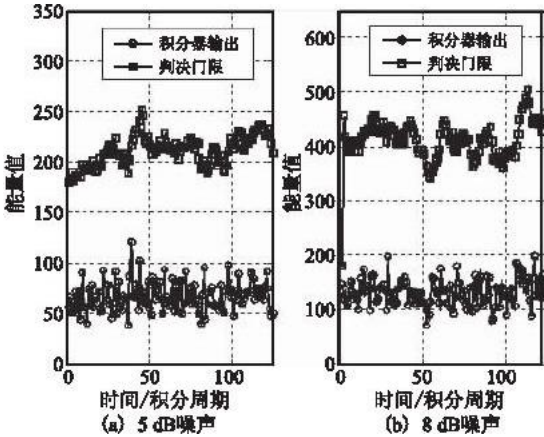


图5 输入噪声时判决门限同步跟踪图

Fig.5 The threshold trace under different noise power

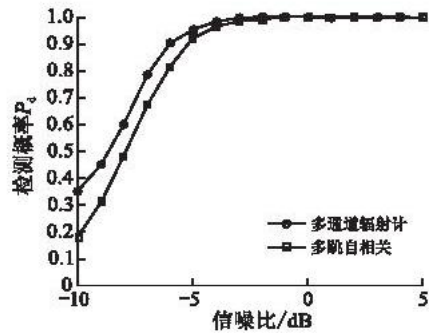


图6 2 种方法对 JTIDS 信号的检测性能对比

Fig.6 The detection performance of MHAC and multichannel radiometer for JTIDS signal

4 结束语

本文首先研究了 Link - 16 的通信体制,并据此分析了将多通道辐射计应用于 Link - 16 信号检测所存在的不足。然后设计了新的门限算法,使基于多通道辐射计架构的跳频检测接收机适合于 Link - 16 信号特性,实现了 Link - 16 信号检测。最后对多通道辐射计的检测性能进行了测试、分析。仿真结果表明,改进的门限算法在低信噪比时对 Link - 16 信号的检测性能优良。JTIDS 共有 51 个跳点,采用多通道辐射计检测,

需要 51 个并行通道,设备庞大,同时对 A/D 转换器的采样率和工作带宽提出了较高的要求^[9],因此,如何降低硬件开销问题值得进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 梅文华,蔡善法. JTIDS/Link16 数据链[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
MEI Wenhua, CAI Shanfa. JTIDS/Link16 data link [M]. Beijing: National defense industry press,2007. (in Chinese)
- [2] 刘武刚,杨建波,刘鹏. 基于延时相乘-相关的 JTIDS 检测[J]. 通信技术,2010,43(5):7-9.
LIU Wugang, YANG Jianbo, LIU Peng. JTIDS signal detection based on delaying multiplication and segment correlation[J]. Communications technology, 2010,43(5):7-9. (in Chinese)
- [3] 王磊,杨建波,李彦志. JTIDS 信号的检测技术研究[J]. 通信对抗,2008,29(1):30-34.
WANG Lei, YANG Jianbo, LI Yanzhi. Research on detection technology of JTIDS signals [J]. Communication countermeasures, 2008,29(1):30-34. (in Chinese)
- [4] 徐振平. 扩频信号检测与参数估计[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
XU Zhenping. Spread spectrum signal detection and parameters estimation [D]. Changsha: National university of defense technology, 2007. (in Chinese)
- [5] 范海宁. 跳频信号盲检测和参数盲估计算法研究[D]. 西安:空军工程大学,2010.
FAN Haining. Research on blind detection and blind parameter estimation of frequency-hopping signals [D]. Xi'an: Air force engineering university, 2010. (in Chinese)
- [6] Nemsick L W, Geraniotis E. Adaptive multichannel detection of frequency-hopping signals [J]. IEEE transactions on communications,1992,40(9):1502-1511.
- [7] Miller L E, Lee J S, Torrieri D J. Frequency-hopping signal detection using partial band coverage [J]. IEEE trans on aerospace and electronic systems,1993,29(2):540-553.
- [8] Lehtomaki Janne J. Maximum based detection of slow frequency hopping signals [J]. IEEE communications letters,2003,7(5):201-203.
- [9] 王爱粉,刘炯,苟彦新. 超短波跳频信号的侦察方案探讨[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2002,3(1):43-45.
WANG Aifen, LIU Jiong, GOU Yanxin. The exploration of scout UHF frequency hopping signals scheme[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2002,3(1):43-45. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Scheme Design of Blind Detection to Link-16 Signal

ZHANG Dong-wei, GUO Ying, HUO Wen-jun, QI Zi-sen, ZHANG Bo

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Design of an effective detection scheme for high-speed frequency-hopping signal is the groundwork for Link-16 signal detection. This paper presents a detection scheme based on multichannel radiometer structure. The communication mechanism and high-speed FH characteristic of Link-16 are analyzed in detail. Then, to surmount the deficiencies caused by directly applying multichannel radiometer in Link-16, this paper designs a new adaptive threshold algorithm and a new judicative rule, presents a feasible modification rule for the channel detection results and finally based on multichannel radiometer achieves the Link-16 signal detection. The simulation results of this scheme show that the threshold algorithm of this detection scheme has a good adaptability to the amplitude of input signal, which can be used to effectively solve the problem of Link-16 signal detection under low SNR and to make the channel detection results independent of the background noise.

Key words: Link-16; JTIDS; blind signal detection; channelized; adaptive threshold