

文章编号: 1005-8451 (2010) 09-0045-04

DS-FH 混合扩频技术在CBTC车地通信中应用的研究

张 焱, 薛 伟

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

摘要: 分析无线扩频技术在CBTC车地通信系统中的应用现状, 通过对直接序列扩频和跳频扩频两种通信体制抗干扰能力优缺点的比较, 提出将DS-FH混合扩频技术应用到CBTC车地通信中, 并分析其抗干扰性能。

关键词: CBTC; 车地通信; 无线扩频; DS-FH混合扩频

中图分类号: U285 : U284.482 **文献标识码:** A

Research on application of DS-FH spread spectrum technique to CBTC wireless communication

ZHANG Wen, XUE Wei

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The main target of the paper was to analyze the situation about the use of wireless spread spectrum technique in the CBTC System. Through the comparison of the anti-jamming capability with the Communication System of direct-sequence (DS) spread spectrum and frequency hopping(FH) spread spectrum, DS-FH spread spectrum technique was raised up to on-board/ground Communication System, and its anti-jamming performance was discussed.

Key words: CBTC; on-board/ground communication; wireless spread spectrum; DS-FH spread spectrum

随着计算机和通信技术在列车控制领域的应用, 基于无线通信的列车控制(CBTC)系统在提高运输效率的同时可以降低运营和维护费用, 增加车-地通信数据带宽, 提高系统升级和扩展能力, 使列车的运行更安全、更高效, 已成为国内外城市轨道交通列车控制系统的发展趋势。

1 CBTC中的无线通信技术

目前, 在CBTC系统中, 完全采用无线传输方式的技术有两种: GSM-R (GSM for Railway) 和基于IEEE802.11系列标准的WLAN无线局域网络。在我国, GSM-R主要应用于干线铁路的列车控制系统中, 目前投入使用的有青藏线和基于CTCS3技术标准的武广线、京津城际线等铁路。而基于WLAN的车地通信系统已经逐渐成为国内外城市轨道交通列控系统的首选方案^[1], 如图1。

无线局域网的传输方式涉及到采用的传输媒体、选择的频段及调制方式。无线局域网采用的传输媒体主要有两种, 即无线电波与红外线。在采用

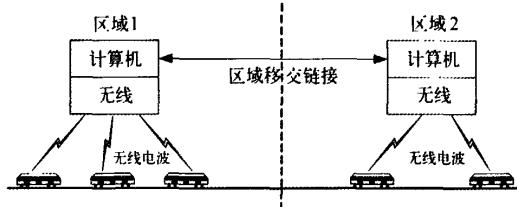


图1 基于 WLAN 的 CBTC 系统

无线电波为传输媒体时, 无线局域网按照调制方式不同, 又可分为扩展频谱方式与窄带调制方式。目前, CBTC系统中主要采用基于扩展频谱方式的无线局域网。

基于无线通信的车地通信系统是轨道交通信号系统的发展趋势, 各主要信号系统公司都在开发和试验自己的基于WLAN的车地通信信号系统, 许多已投入商业运营。

例如, 德国的西门子公司目前在我国推荐实施基于无线的移动闭塞信号系统, 其无线系统采用基于直接序列扩频技术, 广州地铁和北京地铁等多个轨道交通项目中都采用了该系统; 法国阿尔卡特公司的CBTC系统的无线通信采用基于跳频扩频标准的WLAN技术, 该系统已经分别在拉斯维加斯单轨线和北京地铁开通运营; 阿尔斯通

公司基于 WLAN 的移动闭塞信号系统中，无线通信采用正交频分复用方法。日立公司的无线系统采用以直接序列扩频技术为基础开发的多通道传输的扩频方式。另外基于无线通信传输的 CBTC 系统还包括庞巴迪公司的 CBTC 系统、通用公司的 AATC 系统等。基于 WLAN 的 CBTC 系统经过在多条线路上的运营调整，技术已经较为成熟，并逐步完善。

2 WLAN 中的无线扩频技术

扩频技术是近年来发展非常迅速的一种通信技术，其数据传输速度可达几十 Mbit/s，它不仅可以传送一般的列车状态信息，还可以传送列车的各种视频图像、声音等大容量信息，这是其他车地通信系统无法做到的。在传输信息量越来越大的需求下，无线传输通道必须同时满足高容量的数据信息和适应快速移动状态两个条件。地铁列车运营过程中车站值班员、控制中心调度员、车辆段车务人员等需要对列车车厢内进行实时图像监控，列车驾驶员需要对前方道路状况和车站旅客候车情况进行实时监控，以及在运行车辆中实现高清晰数字视频的实时播出等。为满足这些需求，必须在车地之间选用高速数据无线传输通道，无线扩频通信技术无疑成为一个理想之选。

扩频通信技术是一种信息传输方式，通过扩频码将基带数据信号的频谱扩展至很宽的频带（成百上千倍）后，搬移至中频调制后发射出去，接收端采用相关接收的原理，将扩展的频谱恢复到基带信号的频谱，但干扰信号频谱功率降低，从而抑制了传输过程中存在的干扰。这种方法虽然增加了频带带宽，但单位带宽上的功率很小，即信号功率谱密度很低。信号淹没在白噪声之中，提高了通信系统的抗干扰能力和安全性。而较低的功率谱密度，也很少对其他电子设备构成干扰。

扩频通信的理论基础是信息论中的香农公式，该公式表明，当传输系统的信噪比 S/N 下降时，可用增加系统传输带宽 W 的方法来保持信道容量 C 的不变，而保证了系统无差错传输信息的速率。扩频技术正是利用这一原理，用高速率的扩频码来达到扩展待传输的数字信息带宽的目的。

3 2 种扩频方式比较

目前的扩频通信系统按照扩展频谱的方式不同，主要可以分为：直接序列扩频、跳频扩频、跳时扩频、线性调频扩频，以及这几种扩频方式的组合。由于其抗干扰的机理不同，它们都具有较强的抗干扰性能，但也有各自的不足之处^[2]。下面就 CBTC 车地通信所面临的干扰问题对直扩和跳频进行比较。

(1) 抗强的定频干扰。对于强的定频干扰信号，直扩系统通过处理增益处理干扰容限以内的干扰，超出范围的就很难达到处理要求，而跳频系统能够靠载波的随机跳变，躲避干扰，将干扰排斥在接受通道以外达到抗干扰的目的，若跳频系统的可用频道很大，在某一个频点停留时间很短，才有好的效果，所以对固频干扰信号的抗干扰性，跳频系统效果更好。

(2) 抗衰落性。直扩系统的射频宽度比跳频系统宽得多，因此少量的频谱的衰落对直扩系统中信号的改变影响不大，相反跳频系统的窄带宽与选择性接收则会使一定频率损失，频率选择性衰落将导致若干个频率受到影响，导致系统性能恶化。

(3) 抗多径。多径干扰是由于电波传播过程中遇到各种反射体（如隧道壁、轨旁装置）引起，使接收端信号产生失真，导致码间串扰，引起噪音增加。而直扩系统可以利用这些干扰能量提高系统的性能。跳频系统要抗多径干扰，要求每一跳驻留的时间很短，就要增加跳频速率，但这又加大了系统的难度，实际应用中难以实现，所以直扩系统的抗多径性能略优。

(4) “远-近”效应。“远-近”效应主要由于接收机远离信号源，随着信号的长距离传输，信号路径不断衰减，干扰信号不断增强，一旦干扰信号超过接收机的干扰容限就会影响其正常运行。而跳频原理的接收机通过躲避原理和前段电路处理，使干扰衰减，所以相比较而言，“远-近”效应对跳频信号影响最小。

(5) 同步。直扩系统的伪随机码速率高、长度长，使得对同步的精度要求高，同步所需的时间长（一般在秒级），入网相对较慢，而跳频系统完成同步的时间在毫秒级，所以跳频系统较好。

(6) 信号处理。直扩系统与跳频系统采用的检测方式不同。跳频系统适合非相干检测，直扩系统则采用相干检测，但需要载波恢复电路和恢复相位差才能进行，实现起来成本昂贵，不但增加了整个系统的复杂程度，同时降低了系统性能。

(7) 多网工作。直扩系统和跳频系统与单载波系统比较，由于其多址能力强，造成频谱利用率高，而直扩系统与跳频系统之间，无论是组网能力还是频谱利用率都是跳频系统略优。

(8) 通信安全保密。扩频系统的保密性总体较强，但直扩与跳频原理的不同，保密性能也不相同。直扩系统的低密度频谱可隐藏在噪声信号中，几乎不可发现，而跳频系统的频谱跳变造成瞬时功率谱变大，很难隐藏。

综上所述，直扩系统和跳频系统各有优缺点，应当根据实际情况选择使用。目前城市轨道交通系统中，大都采用基于单一扩频方式的CBTC车地通信系统，但是，在地铁隧道这种复杂的工作环境中，仅采用单一扩频方式很难达到应用的需求，将两者有机的结合起来形成互补，就可以适应各种工作环境，达到所需的技术要求，更进一步降低系统的维护成本和工作难度。因此，提出将直扩和跳频混合的扩频技术应用到CBTC车地通信系统中。

4 DS-FH 混合扩频技术

4.1 DS-FH 混合扩频原理

直接序列和跳频混合扩频技术，简称DS-FH，是在直接序列扩频的基础上增加了载波频率跳变的功能，综合了DS和FH两种扩频方式的优点，同时克服了单一扩频方式的不足，因而能更有效地对抗干扰。

首先对基带信号进行直接序列扩频，形成DS信号，然后对DS信号进行跳频扩频发射出去，这样就形成了DS-FH信号。接收方在收到DS-FH信号后，首先对接收信号进行解跳，得到一个固定中频的直扩信号，然后再进行解扩，最后对接收信号进行解调，恢复出原始信号^[3]。混合扩频系统中，用到两个伪码，一个用于直扩，一个用于跳频中控制频率合成器。一般直扩码的速度比跳频码的速度高得多。DS-FH混合扩频系统的基本原理如图2。

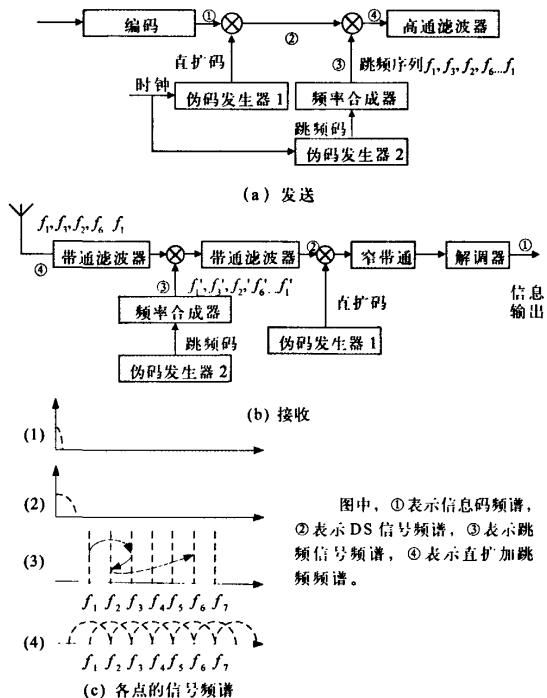


图2 DS-FH扩频原理

图2(a)中，在发送端，从编码器输出数字基带信号与PN码发生器1产生的直扩码在相关码发生器中进行时域相乘，也就是模2加运算，扩频码的速率远大于基带信号的速率，乘法器输出后的基带信号带宽被扩展。PN码发生器1与相关码发生器统称为扩频器。

PN码发生器2和频率合成器构成跳频器；伪随机码序列构成跳频图案，作为指令控制频率合成器产生频率 f_i ，使载波频率有规则地发生跳变，假设跳变的顺序为 $f_1, f_3, f_2, f_6, \dots, f_1$ 。那么已经被扩展的信号就按照跳频速率依次使用频率 $f_1, f_3, f_2, f_6, \dots, f_1$ 对传输数据进行搬移。输出信号即为一个直扩加跳频的混合扩频信号。

图2中直扩码和跳频码可以是由同一个PN码发生器产生，也可以使用不同的PN码发生器，但它们在时间上必须是相互关联的，因此由同一个时钟控制。

图2(b)为接收端的原理图。其中，伪码发生器2、频率合成器和相关器构成解跳器，PN码发生器1和乘法器构成解扩器。跳频伪随机序列产生电路在捕获同步跟踪电路作用下，取得与发送

端同步的相同跳频图案后，控制频率合成器输出比外来信号高出一个中频的跳变频率 $f_1', f_3', f_2', f_6' \dots f_1' \dots$ 。扩频信号经过滤波后进入混频器，完成解跳，此时信号为一固定中频的扩频信号，再与直扩码发生器产生的随机序列相乘，进行解扩，恢复成窄带信号，经过窄带滤波器消除干扰信号，最后送入解调器恢复出信源信号。

图2(c)中的(1)为基带信号的频谱；(2)为扩频后的信号频谱，它与扩频码的频谱一样；(3)为频率合成器输出的频率发生跳变后的载波信号频谱，箭头指示为其跳变的顺序；(4)为直扩信号又发生载波跳变后的信号频谱，与跳频系统不同的是混合扩频信号在每一个特定时刻都是一个宽带系统。图中虚线所示就是跳变而形成的宽带谱。

4.2 DS-FH 混合扩频性能分析

一般而言，扩展频谱系统的处理增益可以表征系统的抗干扰能力。处理增益即扩展频谱处理器输出信噪比和输入信噪比之差。对于DS系统，处理增益可以表示为 $G_p = R_c / R_a$ ， R_c 为伪随机码速率， R_a 为信息码元速率。而对于FH系统，处理增益为系统提供的跳频频数为 $N^{[4]}$ 。如果进行频率跳变扩频，各频点间的频谱互相不重叠时，DS-FH扩频系统的处理增益为直扩处理增益和跳频处理增益之积，即： $G_{DS-FH} = G_{DS} \cdot G_{FH}$ ，其中 G_{DS} 为直扩处理增益， G_{FH} 为跳频处理增益。如果用 dB 表示处理增益时，则有： $G_{DS-FH}(\text{dB}) = G_{DS}(\text{dB}) + G_{FH}(\text{dB})$ 。由此可见，DS-FH 扩频系统能利用小处理增益的 DS 和 FH 信号产生大的处理增益，如果单独使用 DS 系统或 FH 系统，产生同样的大处理增益则系统实现要复杂的多。

处理增益 G_p 反映了在理想通信环境（无噪声）下扩频通信系统信噪比改善的程度，但在任何实际的工作环境中，噪声总是存在的，尤其在地铁这种复杂的环境下，噪声的影响是巨大的。因此，在实际工程设计中，还需要提出抗干扰容限这一概念。

抗干扰容限是指扩频通信系统能在多大干扰环境下正常工作的能力，定义为： $M_j = G_p - [(S/N)_{out} + L_s] \text{dB}$ ， L_s 为干扰容限， $(S/N)_{out}$ 为系统内部损耗，为系统正常工作时要求的最小输出信噪比。

干扰容限直接反映了扩频系统接收机可能抵抗的极限干扰强度，只有当干扰信号的功率超过干扰容限后才能对扩频系统形成干扰。因而干扰容限往往比处理增益更能确切地反映系统的抗干扰能力。

采用 DS-FH 混合扩频系统技术，有利于提高系统的抗干扰性能，因为干扰信号必须同时满足两个条件才能对传输造成影响：(1) 干扰信号的频率变化要与跳频频率的变化相同；(2) 干扰电平必须超过直扩系统的干扰容限^[5]。否则就不能对系统构成威胁，这样就降低了信号受到干扰的可能性，从而达到较高的抗干扰性能。

5 结束语

无线通信是一种容易受到干扰的通信体制，因此必须研究有效的抗干扰技术以对付严重的干扰威胁。在列车控制系统中，数据传输系统传输的对象是现场智能终端之间交互的控制信息和状态信息，这些涉及行车安全的重要数据信息在传输时一旦发生差错就会危及整个列车控制系统的安全，并且列车的高速移动使得一些不利因素的影响加剧，因此要求CBTC数据传输系统有较高的安全性和保密性。

DS-FH 系统结合了 DS 系统和 FH 系统的优点，如抗多径能力强，抗窄带干扰能力强等，同时克服了它们的一些缺点，它可用短的直扩码和跳频码实现大的处理增益，减少了同步所需时间和难度。由此可见，将 DS-FH 混合扩频技术应用于 CBTC 系统中具有现实意义和实用价值。

参考文献：

- [1] 徐果, 黎江. 无线传输系统在列车运行自动控制中的应用与发展[J]. 铁道勘测与设计, 2006 (5): 35-38.
- [2] 韦惠民. 扩频通信技术及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- [3] 林继华. 一种 DS-FH 混合扩频通信系统抗远近效应的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003, 3.
- [4] 王毅. 跳扩混合系统的同步技术研究与实现[D]. 成都: 成都电子科技大学, 2007.
- [5] 查光明, 熊贤祚. 扩频通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.