

文章编号: 0258-2724(2016)03-0405-13 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2016.03.001

# 高移动无线通信 抗多普勒效应技术研究进展

范平志, 周维曦

(西南交通大学移动通信研究所, 四川 成都 611756)

**摘 要:** 车辆高速移动所产生的多普勒效应, 对于高铁等高移动场景下的宽带无线通信具有极大的危害性, 严重影响无线通信系统的可靠性和容量. 本文系统地讨论了 3 类抗多普勒效应应对技术, 即多普勒规划、多普勒补偿和多普勒利用, 给出了作者在多普勒利用方面的最新研究进展: 对于多普勒规划, 主要通过系统初始设计在一定程度上降低多普勒效应的危害; 对于多普勒补偿, 必须准确估计多普勒频偏从而进行补偿或抵消, 以大幅减小多普勒效应的影响; 对于多普勒利用, 应设法运用多普勒效应, 化废为宝, 挖掘时变信道提供的潜在多普勒分集增益.

**关键词:** 高移动性; 快时变信道; 多普勒效应; 多普勒估计; 多普勒补偿; 多普勒分集

**中图分类号:** TN929.5 **文献标志码:** A

## Advances in Anti-Doppler Effect Techniques for High Mobility Wireless Communications

FAN Pingzhi, ZHOU Weixi

(Institute of Mobile Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** Doppler effect arising during a fast moving vehicle is very harmful to the wireless communications systems in high-speed trains and similar high mobility scenarios, affecting significantly the communication reliability and capacity. In this work, three categories of anti-Doppler effect techniques were analyzed, i. e., Doppler planning, Doppler compensation and Doppler utilization, especially the authors' recent work in Doppler utilization. In Doppler planning, the initial system design should ensure that the Doppler effect is reduced to a certain degree; in Doppler compensation, the Doppler offset should be firstly estimated accurately; then it can be greatly compensated or even canceled; as for Doppler utilization, it aims at collecting the potential Doppler diversity gains inherent in the time-varying channels, thus turning interference into assets.

**Key words:** high mobility; fast time-variant channel; Doppler effect; Doppler estimation; Doppler compensation; Doppler diversity

交通和通信是国家经济发展的两个重要支撑. 近年来我国交通事业发展迅猛, 根据《综合交通网中长期发展规划》到 2020 年, 我国将建成 12 万 km 铁路, 其中时速超过 200 km 的高速客运专线达 1.8 万 km<sup>[1]</sup>. 实际上, 到 2015 年底, 国家规划的

“四纵”干线就将成型, 高速铁路营业里程将达 1.9 万 km, 约占世界高铁运营里程的 60%. 同时, 基于铁路数字移动通信系统 (GSM-R), 已经初步建立一张移动通信网络, 确保高铁列车平稳、安全、高效运营<sup>[2]</sup>.

收稿日期: 2015-10-06

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2012CB316100); 国家自然科学基金资助项目 (61032002); 国家 111 工程资助项目 (111-2-44); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (SWJTU12ZT02, 2682014ZT11)

引文格式: 范平志, 周维曦. 高移动无线通信抗多普勒效应技术研究进展 [J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(3): 405-417.

为了应对高铁旅客宽带无线通信和车载无线传感网络大数据传输需求,解决现有无线通信的技术瓶颈,我国在相关无线通信关键技术展开了大量研究并取得重大突破.我国主导的第4代(4G)移动通信标准 TD-LTE(时分双工-长期演进)已经开始大规模商用,第5代(5G)移动通信标准也通过 IMT-2020(5G)推进组开展了大量研究<sup>[3]</sup>.然而,如何在超高速移动场景下提供稳定、可靠、高效的宽带无线通信服务,仍然面临许多技术挑战<sup>[4-6]</sup>,而基于 GSM-R 的无线通信技术数据承载能力有限(最大传输速率 200 kbit/s),仅能够满足基本的铁路调度与控制业务需求<sup>[2]</sup>.

高移动场景无线通信面临的挑战,近年已经引起学术界的广泛关注,并以综述或特刊等形式集中呈现高移动无线宽带通信的最新研究进展,例如,国际知名期刊 IEEE Communications Surveys & Tutorials<sup>[7]</sup>、IEEE JSAC<sup>[8]</sup>、EURASIP JWCN<sup>[9]</sup>、JMT<sup>[10]</sup>、Science Bulletin<sup>[11]</sup>等.此外,在国家 973 计划和 IEEE 车辆技术学会(VTS)支持下,于 2012 年创立了高移动无线通信(HMWC)国际会议,更大规模的国际会议如 IEEE ICC2012、IEEE VTC2016-Spring 等也组织了高移动无线通信专题论坛.与此同时,工业界也积极推动标准制定(LTE-R)和实验组网试运行<sup>[12-14]</sup>.

研究和实验表明,高移动场景无线通信面临的重要挑战有:高穿透损耗、快速切换、多普勒效应

等.为了保证高速移动的车厢或其他移动体的受力强度,通常采用采用密闭金属作为外壳,因而对电磁信号具有屏蔽特性;基站和移动车体距离越远,信号强度衰减越大,越难保证通信质量<sup>[15-16]</sup>.每个基站在一定范围内服务移动设备,超出此范围时会将服务转交给下一个基站,称作小区切换;移动速度越高,切换频度越高,要求小区切换速度越快,以保证切换成功率<sup>[17-18]</sup>.相对高穿透损耗和快速切换,多普勒效应<sup>[19-20]</sup>是高移动场景无线通信更为棘手的挑战.多普勒效应主要带来两方面的影响,即载波频率偏移(CFO)<sup>[21-22]</sup>和信道快衰落<sup>[23-24]</sup>.由于发送机和接收机的快速相对位移,接收信号的载波频率因多普勒效应偏离原值,导致接收信号载波频率和本振频率之间存在偏差,从而带来性能严重损耗.另一方面,多普勒效应导致信道随时间快速变化(时间选择性),称为快速衰落,同样严重影响系统性能.

移动速度越高,多普勒效应对通信性能的影响越严重,造成误码率、计算复杂度、通信时延、数据传输率、传输容量在内的多项通信系统性能指标严重恶化.为保证高移动性、高数据传输率的“两高需求”,必须克服载波频率偏移,使信号传输适应信道快速时变特性.如图 1 所示,从避免、降低和利用 3 种不同角度,抗多普勒效应的策略可以归纳为 3 类:多普勒规划、多普勒估计/补偿和多普勒分集.



图 1 对抗多普勒效应的策略

Fig. 1 Strategies to combat Doppler effect

最简单和直接对抗多普勒效应的方法是通过系统规划、合理配置参数,在一定程度上直接避免多普勒效应发生<sup>[25-32]</sup>.多普勒效应的严重程度由多普勒频移和符号周期共同度量,前者直接影响 CFO 和信道快衰程度,后者间接影响信道衰落的快慢.根据多普勒频移的计算公式,可以发现瞬时的多普勒频移与载波频率、运动速度以及信号与运动方向的夹角相关.因此,将控制面与数据面分离<sup>[25-26]</sup>并选用较低频率的载波支撑高移动性,可以直接、有效地降低多普勒频移的大小<sup>[27-28]</sup>;针对铁路等固定运行轨迹的移动通信系统,尽量缩小基

站与运动轨迹的距离,使最大掠射角趋近 90°,缩小信号与运动方向的瞬时夹角,从而降低瞬时多普勒频移及其变化率<sup>[28-31]</sup>;在多普勒频移固定的情况下,根据信道的相关时间(由最大多普勒频移决定,在此时间长度下信道相对稳定)调整符号周期的大小,可减轻信道快速衰落程度;在正交频分复用(OFDM)系统里,也可以通过调整子载波间隔,以避免产生较大的子载波间干扰(ICI)<sup>[32]</sup>.然而,在实际系统中,系统规划和参数配置受到多个目标制约,参数实际可调整的范围十分有限.

多普勒估计/补偿是抵抗多普勒效应的典型方

法<sup>[29,33-49]</sup>.多普勒频移补偿校正的示意图见图2,由频率估计模块和频率补偿模块共同实现.假定多普勒效应导致接收频率频移 $\Delta f$ ,频率估计模块尝试对其估计和跟踪,得出估计的偏移值 $\Delta f'$ ,然后频率补偿模块将 $\Delta f'$ 补偿给接收信号.处理后的载波频率等效为 $f_0 - \Delta f + \Delta f'$ ,它与本振频率 $f_0$ 的差值决定了多普勒估计/补偿的性能,因此应尽力实时地最小化这一差值.实现多普勒估计的算法分为盲频移估计<sup>[36-39]</sup>、基于冗余的频移估计<sup>[40-44]</sup>、基于先验信息(位置、速度、频谱地图等)的频移估计<sup>[29,45-46]</sup>3类.两步估计算法<sup>[43]</sup>以及自动频率校正(AFC)技术<sup>[47]</sup>可有效地提高多普勒频移估计的准确性和实时性,前者逐级进行粗同步和精同步,后者引入反馈机制将频率估计和频率补偿闭环.实际系统中,复杂的散射环境使信号在多条传播路径上产生不同的多普勒频移,解决多频移的估计与补偿是系统面临的一个难题<sup>[48]</sup>.单独考虑CFO往往不是对抗多普勒效应的最佳途径,联合CFO和信道估计以及利用多普勒分集等技术综合解决CFO和信道快速变化,是抗多普勒效应的必由之路<sup>[49]</sup>.同时,移动速度或信号达到角快速变化引起频移变化剧烈,频移估计快速跟踪算法及其鲁棒性是高铁等高移动场景下无线通信的重要问题<sup>[50-53]</sup>.

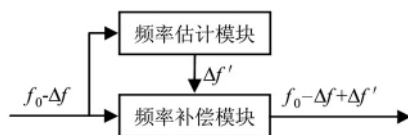


图2 多普勒频率校正原理  
Fig. 2 Doppler frequency correction principle

前两种策略是将多普勒频移(扩展)看作不利因素,主要目的是补偿或降低多普勒效应带来的负面影响<sup>[54-65]</sup>.在高移动性环境下,信道的快速时变导致很难实现快速准确的估计或补偿,而多普勒分集将多普勒扩展看作一种分集方式,将频率偏移作为一种分集资源加以利用,从而增强有用信号能量,改善系统性能<sup>[54]</sup>.多普勒分集的研究按可否获得完备的信道估计信息分为两类,完备信道估计条件下的多普勒分集技术致力于挖掘信道自由度,实现最大多普勒分集阶<sup>[55-59]</sup>;而非完备信道估计条件下的多普勒分集技术重点研究信道估计误差对分集性能的影响<sup>[60-65]</sup>.一般而言,发送接收联合设计才能获得最大多普勒分集,其最大多普勒分集阶由信道相关矩阵的秩决定,多普勒分集可与多径分集、空间分集一同实现.然而,经典的多普勒分集技

术均假定信道信息完备可知,然而在高移动场景下系统却很难获得准确及时的信道信息<sup>[66-69]</sup>.从实际系统应用出发,作者近年来致力于研究多普勒分集增益与信道估计误差的折衷关系,以及非完备信道条件下的多普勒分集传输的设计,取得了一些重要研究成果<sup>[61-65]</sup>.

下面各节将具体分析多普勒效应及其带来的挑战,并逐一讨论3类抗多普勒效应技术.

## 1 多普勒效应对高移动无线通信系统带来的挑战

### 1.1 多普勒效应

在移动通信环境下,发射源与接收体之间存在相对运动,接收体接收信息的频率与发射源发射信息频率不同,这种现象称为多普勒效应,而接收频率与发射频率之差称为多普勒频移<sup>[19]</sup>.

以高铁场景沿线移动通信为例(如图3所示),铁道旁基站源发送信号,接收信号的车载移动台或车内移动终端在时间 $\Delta t$ 内以速度 $v$ 从 $(x, 0)$ 运动到 $(x_0, \rho)$ ,基站与移动方向的垂直距离为 $d$ ,信号与移动台移动方向的瞬时夹角为 $\theta(t)$ .多普勒频移 $f_d$ 可以用如下公式计算:

$$f_d = \frac{v \cos \theta(t)}{\lambda} = \frac{v f_c}{c} \cos \theta(t) = f_D \cos \theta(t), \quad (1)$$

式中: $c$ 为光速; $v$ 为接收天线移动速度; $f_c$ 、 $f_D$ 和 $\lambda$ 分别是载波频率、最大多普勒频移和载波波长.

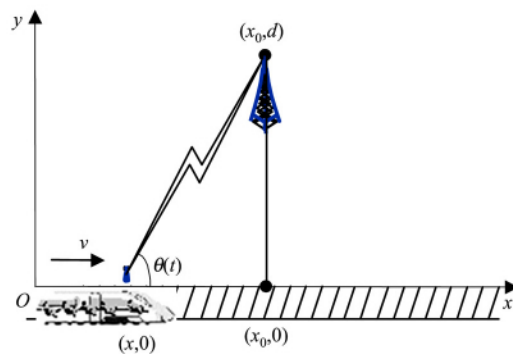


图3 多普勒效应  
Fig. 3 Doppler effect

表1给出了在不同 $f_c$ 和 $v$ 条件下的 $f_D$ 值.可以看出,当载波频率为2.5 GHz,移动速度达350 km/h时(目前高铁的典型运营速度) $f_D$ 高达810 Hz.

通常,到达接收天线的多个路径信号有各自的延迟、幅度衰减、相位偏移和多普勒频移,接收信号会同时受到多径传播和多普勒效应的影响.由于多

径效应,如果电波到达角  $\theta \in [0, \pi]$ ,接收功率将分布在  $[f_c - f_D, f_c + f_D]$  区间上,接收信号带宽增加,导致产生多普勒扩展(Doppler spread).在高速移动的情况下,多普勒扩展十分常见.

表1 不同载波频率、移动速度下的最大多普勒频移  
Tab.1 Maximum Doppler shift  $f_D$  at different carrier frequencies and velocities Hz

$f_c/\text{GHz}$	$v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$						
	200	250	300	350	400	450	500
0.9	167	208	250	292	333	375	417
1.8	333	417	500	583	667	750	833
2.5	463	579	694	810	926	1042	1157
2.6	481	601	722	842	962	1083	1204

## 1.2 多普勒效应对无线通信的挑战

多普勒效应对无线通信性能影响分为两个方面:在信号解调方面,多普勒效应导致接收信号频率与本振频率存在偏差,载波频率偏移造成信号解调性能严重下降,无线链路极不稳定;在符号检测层面,多普勒效应导致信道系数随时间快速变化,信道快衰落造成符号检测性能严重下降,误比特率(BER)变大.随着移动速度增高  $f_D$  越大,载波频率偏移与信道快时变越严重.特别地,对正交频分

多址接入(OFDM)系统,载波频率偏移会破坏子载波间的正交性,引入子载波间干扰(ICI),从而严重降低系统性能.考虑子载波数为  $N$  的 OFDM 系统,若载波频率偏移为  $\Delta f$ ,则第  $k$  个子载波接收到的信号可写作<sup>[33-34]</sup>:

$$Y_k = H_{\Delta f k} X_k + I_k + W_k, \quad (2)$$

式中:  $Y_k$ ,  $X_k$  和  $W_k$  分别表示接收信号采样、发送符号和第  $k$  个子载波上的加性高斯白噪声(AWGN);

$$H_{\Delta f k} = \frac{H_k \sin(\pi \Delta f)}{K \sin(\pi \Delta f / K)} e^{j\pi \Delta f (K-1)/K},$$

其中:  $H_k$  表示第  $k$  个子载波在频域上的系数;  $I_k$  表示第  $k$  个子载波上的子载波干扰,可表示为

$$I_k = \sum_{u \neq k} H_u X_u \times \frac{\sin(\pi \Delta f) e^{-j\pi \Delta f (N-1)/N}}{N \sin(\pi(u-k+\Delta f)/N)} e^{-j\pi(u-k)/N}, \quad (3)$$

可以看出,ICI 的功率随着 CFO 的增加而增加,只有当  $\Delta f$  为 0 时,不发生子载波间干扰.

多普勒效应带来的另一挑战为信道快时变.图4给出了在载频  $f_c = 2.6 \text{ GHz}$ ,带宽  $B = 20 \text{ MHz}$ ,符号块长度  $N = 1000$  时,不同速度下的时变信道响应.从图4可以看出,在高移动场景下,信道随时

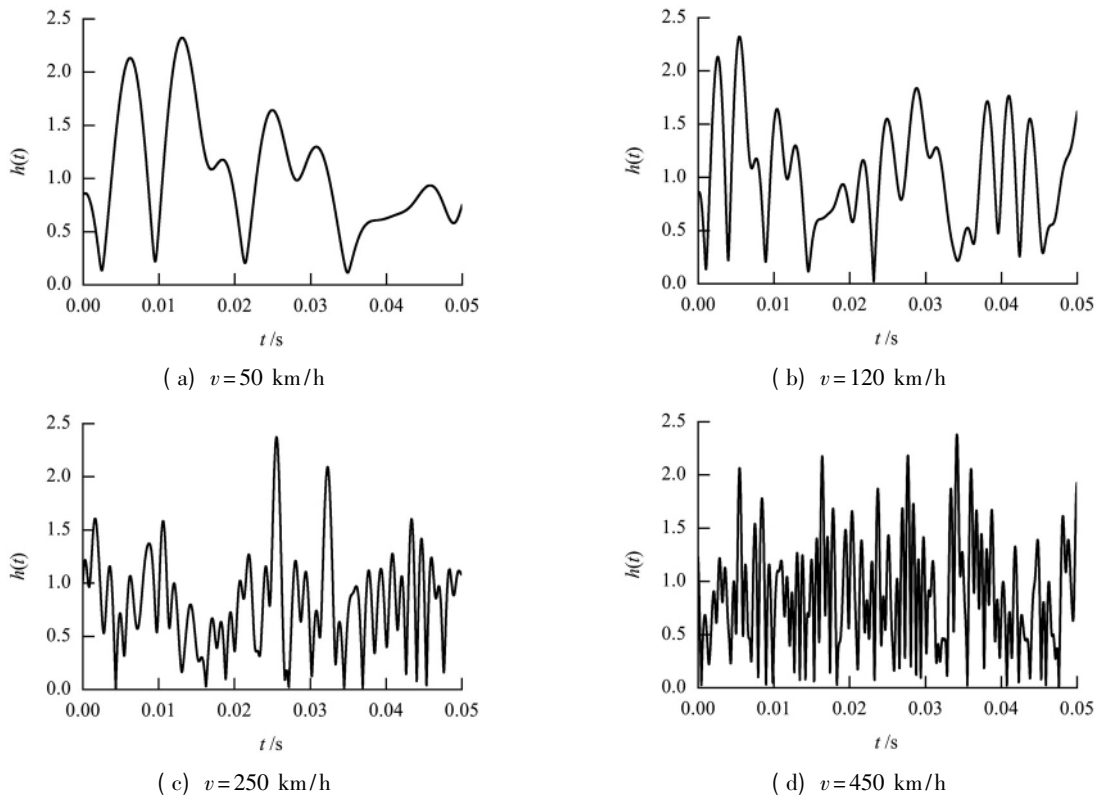


图4 不同移动速度下的信道响应

Fig.4 Channel impulse response at various movement velocities

间迅速变化,呈严重的快衰.同时,信道衰落快慢与符号周期相关,对固定的多普勒偏移,符号周期越长,信道衰落越快,反之越慢.为了统一度量信道衰落的快慢,通常使用归一化多普勒扩展,即最大多普勒扩展和符号周期的乘积,即 $f_D T_s$ ,它体现了相关时间(通常定义为 $T_c \approx 1/f_D$ )和符号周期的相对值.对于参数恒定的通信系统,随着速度增加 $f_D T_s$ 增大,信道衰落更快.

## 2 多普勒规划与系统配置

如前所述,最简单直接对抗多普勒效应的方法是通过系统多普勒规划、合理配置系统参数,在系统初始设计阶段尽量减少有害多普勒效应发生.例如,直接减缓载波频率偏移,降低信道快时变幅度,配置更小符号周期以降低归一化多普勒扩展 $f_D T_s$ 等.下面,从降低多普勒频移和降低归一化多普勒扩展两方面分别讨论.

由式(1)可见,实时的多普勒频移取决于载波频率以及信号与运动方向的夹角,因而降低多普勒频移有两种方法,即降低载波频率和基站选址.配置较低的载波频率有利于降低多普勒效应,表1直观地给出了载波频率与最大多普勒频移的对应关系.为此,在系统初始设计时,应尽量将低频段分配给高移动性中低数据传输(如宏蜂窝),而将高频段分配给静止或低移动性大容量数据传输(如微蜂窝或室内),这样既降低了多普勒危害,又有利于增大信号覆盖和小区半径,从而减少小区切换频度.事实上,在新型无线通信网络架构中,基本思想就是将控制面与数据面分离(C-plane/U-plane split),在频率规划时将低频段用于支持控制基本覆盖和支持高移动性,而将高频段用于支持局域高速率数据传输<sup>[25-26]</sup>.

此外,到达信号与运动方向的夹角呈实时变化,对瞬时多普勒频移的影响十分明显.以高速铁路为例,文献[29]分析了单基站列车直行、多基站列车直行和单基站弯道行驶3类典型列车行驶状况下,基站选址与多普勒频移的关系.基站与铁轨的间距直接影响了多普勒频移变化区域的大小,间距越大瞬时频移相对越小,同时频移变化区域越大,频移变化速率越缓慢,估计和校正难度越低.因此,在不影响覆盖(路径损耗影响不大)的前提下,应适度拉远基站与铁轨之间的距离;在多基站直行时应在铁轨两端交替分布基站,弯道行驶时应将基站放置于弯道内侧.在降低多普勒频移的同时也使

频移变化速率降低,有利于后续多普勒频移估计.

对于单基站直行情况,根据图3中列车与基站的位置关系,可将式(1)写为<sup>[29]</sup>

$$f_d = f_c \frac{v(x)}{c} \frac{x_0 - x}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + d^2}}, \quad (4)$$

式中: $v(x)$ 是列车在位置 $(x, 0)$ 时的速度;基站与铁轨距离为 $d$ ;基站位置为 $(x_0, d)$ .图5给出了移动速度为250 km/h、载波频率1.8 GHz,基站与铁轨距离 $d$ 不同时,多普勒频移随位置变化的仿真图<sup>[29]</sup>.显然,基站与铁轨间距越小,列车的瞬时多普勒越大,同时列车经过基站时多普勒频移变化越快,多普勒估计补偿的难度越高;小区半径越小,最大掠射角越接近 $90^\circ$ , $\cos \theta(t)$ 越接近0,瞬时多普勒频移亦可降低.然而,高铁无线通信的性能还受制于另外两个挑战,即穿透损耗和快速切换,因此必须在基站位置、小区半径、最大掠射角、路径损耗等指标之间进行合理折衷.

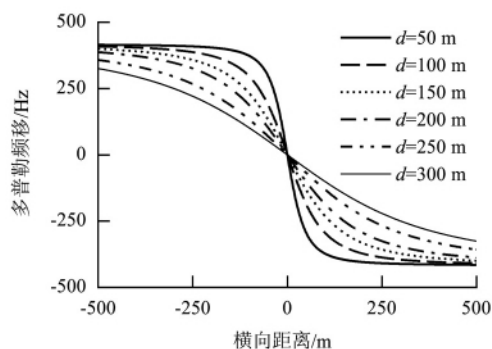


图5 不同基站与铁路距离 $d$ 值时,多普勒频移实时仿真值

Fig. 5 Doppler effect as a function of the horizontal distance between MS and BS, with different value of  $d$

另外,通过缩小符号周期,降低归一化多普勒扩展,可在一定程度上使快时变信道退化为准静止信道.但缩小符号周期会引起对偶的多径效应,使得系统性能或实现效率降低.例如,对单载波系统,缩小符号周期带来的符号间干扰(ISI)或块间干扰(IBI)会造成系统性能降低;对OFDM,缩小OFDM符号周期可降低归一化多普勒扩展,但需要插入更多的导频(CP)以处理相应增加的ISI/IBI,从而造成系统效率降低.

## 3 多普勒估计/补偿

多普勒估计分为3类:盲频移估计、基于冗余的频移估计和基于先验信息的频移估计.能否快速准确地跟踪瞬时CFO是对抗多普勒成败的关键.

在此基础上,文献[47]引入反馈机制,将频率估计和频率补偿闭环,提出一种很实用的抗多普勒技术自动频率校正(AFC)方法.此外,多频移估计、联合CFO信道估计也逐渐受到更多关注<sup>[48-49]</sup>.

### 3.1 盲频移估计

盲CFO估计不需要训练序列、保护间隔或导频之类的冗余信息,仅利用传输信号的特殊结构实现.一般而言,当CFO被较好补偿时不同载波信号幅度的变化非常小,文献[36]据此提出一种基于最小变化(MOV)的CFO估计器,文献[37-38]也给出了一些改进.上述方法通常需要假定相邻的两个符号间信道保持恒定,然而在高移动性环境下,这一前提并不适用.文献[39]提出基于子空间的盲估计算法,在一个符号周期内即可完成频移估计,可有效地跟踪瞬时变化的CFO.

### 3.2 基于冗余的频移估计

虽然盲CFO估计不需要增加冗余,但若合理利用通信系统预置的冗余信息,频移估计性能将得以大幅提升.基于冗余的频移估计可将辅助估计的冗余信息嵌入循环前缀(CP)、导频符号、训练序列或空子载波内,提高频移估计的准确度和实时性.

为了达到快速准确的CFO估计和补偿,通常采用两级捕获和跟踪模块,即粗捕获阶段和精细跟踪阶段<sup>[43]</sup>.首先,在捕获阶段利用最大似然(ML)估计得出CFO的粗略估计,补偿后仅剩余少量CFO.然后,在跟踪阶段,导频等冗余信息用于精确估计CFO余量或随时间变化的短期CFO变化.在实际系统中,基于相位差的估计简单高效,因而被广泛利用.文献[44]指出,估计的精确度可通过对所有导频估计的CFO作加权平均计算进一步提高.

### 3.3 基于先验信息的频移估计

近年来随着GPS、速度传感器等技术的成熟,可获得较为准确的实时位置信息和速度参数等信息,利用这些先验信息可以辅助估计多普勒频移.根据式(4)中对多普勒频移公式的推导,如果获得的位置速度信息精确,可直接通过计算补偿多普勒频移.文献[29]和[45]给出了基于GPS和车速传感器频移估计的具体方法,并分析了先验信息存在误差时的补偿偏差和对系统性能的影响.

更进一步,由于高速列车通常在一个规则、重复可预测的环境下运行,可通过现场测试构建包含多普勒频移信息的频谱地图(REM).基于这些先验信息,结合最大后验估计器(MAPE)降低因位置

估计不准引起的误差,可获得对抗多普勒效应的优异性能<sup>[46]</sup>.

### 3.4 频率自动校正(AFC)

盲频移估计和基于冗余或先验信息的频移估计将估计和补偿分为两个独立的步骤,而频率自动校正技术(AFC)将估计和补偿看作有机整体,形成闭环,能更迅速准确地解决载波频率偏移度问题.AFC的结构示意图6<sup>[47]</sup>,由频率校正模块、解调模块和频率偏差估计模块共同形成闭环.经过校正和解调后的数据反馈给频率偏差估计模块,辅助后续符号进行频率校正.

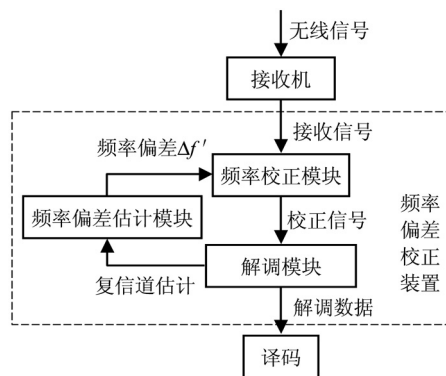


图6 自动频率偏差校正装置

Fig. 6 Auto Doppler frequency correction device

AFC的具体步骤如下:

步骤1 将接收机输出的复数形式信号输入频率校正模块,根据相应的频率偏差估计值 $\Delta f'$ 进行校正.

步骤2 对频率校正后的信号输入标准解调模块,进行信道估计和均衡处理,获得复信道估计值和时延调整量.

步骤3 将该信道估计值和时延调整量输入频率偏差估计模块,估计出下一时刻的频率偏差值 $\Delta f'$ .

### 3.5 多频移估计和联合CFO/信道估计

实际系统中,当信道环境更加复杂的情况下(例如山区丘陵等非平原地带),多普勒效应不再体现为少量多普勒频移分量,而是更加复杂的多普勒扩展,等效的干扰不再服从高斯分布,精确地估计和跟踪变得非常复杂和困难.复杂的散射环境使信号在多条传播路径上产生不同的多普勒频移,解决多频移的估计与补偿是系统面临的一个难题<sup>[48]</sup>.此外,单独考虑CFO往往不是对抗多普勒效应的最佳途径,联合CFO和信道估计以及利用多普勒分集等技术综合解决CFO和信道快速变化

是对抗多普勒效应的必由之路<sup>[49]</sup>.从译码的角度处理相应的快时变信道问题,也是对抗多普勒效应技术的有效补充.

总的来说,准确跟踪多普勒频移是多普勒估计/补偿的重要一环.文献[50]比较了高速铁路特定信道模型下多普勒频移的变化速率,例如在HST3高铁信道模型下,多普勒频移变化速率可达4.8 kHz/s,等效于在LTE系统下4.8 Hz/每子帧(1 ms)或0.34 Hz/每OFDM符号(CP长度为71.4  $\mu$ s).相对于传统场景,高铁多普勒频移变化非常迅速,但仍可将一个OFDM符号甚至一个子帧下的多普勒频移近似看作恒定.特别地,当列车经过基站附近,即信号到达角(AoA)接近90°时,多普勒频移变化非常迅速并会出现正负跳变,在该范围内频移估计鲁棒性较差.因此,现有的基于导频的频移估计算法在导频位置的估计仍然可行,但对数据位置的频移估计内插就需要更先进的预测机制.例如,通过Kalman滤波、粒子(particle)滤波等方法,可提高快变频移估计的准确性及跟踪性能.考虑到多普勒引起的时变载波频移对实际系统性能的影响,文献[51]提出了一种准确的时变频移模型,并给出界定频移时变或恒定的依据.该依据为,当多普勒频移在考虑的通信周期内相对子载波间隔变化低于1%~2%,则可将该多普勒频移看作恒定,否则视为时变多普勒频移.文献[52-53]分别提出了对速度变化鲁棒性强的频移估计算法.

## 4 多普勒分集

多普勒分集的基本原理与多径分集类似.如图7<sup>[54]</sup>所示,多径效应和多普勒效应等效于使原

始信号在时域和频域上复制和混叠,每一信号副本承载着原始信号信息.通过有效的信号处理技术对时域和频域上的信号副本分离、去除干扰、合并,充分利用分集资源可显著提升系统性能.为了使系统获得多普勒分集增益,可以分别从发送端处理、接收端处理或发送接收端联合处理来实现.其中,前两者通常基于特定传输机制,如多天线、扩频通信(SS)和OFDM系统,通过对发送信号的预处理或接收混叠信号的预处理实现多普勒分集,通常较难获得最大多普勒分集;而系统可获取的最大多普勒分集阶由信道相关矩阵的秩决定,通常只有发送接收联合设计才能获得全分集增益<sup>[55-56]</sup>.

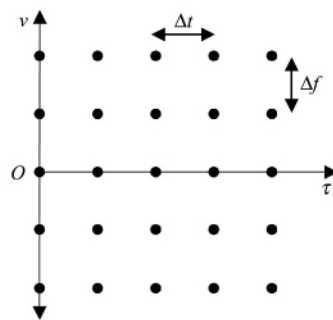


图7 多普勒分集技术原理

Fig. 7 Illustration of Doppler diversity transmissions

如图8所示,传统的多普勒分集技术主要研究最大限度开发信道自由度的方法,大多假定接收机拥有完备的信道状态信息.然而在高移动性无线通信系统中,不可能获得及时准确的信道信息,因而无法避免的信道估计误差将对系统性能造成严重影响.本节分别从以上两方面讨论多普勒分集技术,分析对抗信道快时变的解决方案.

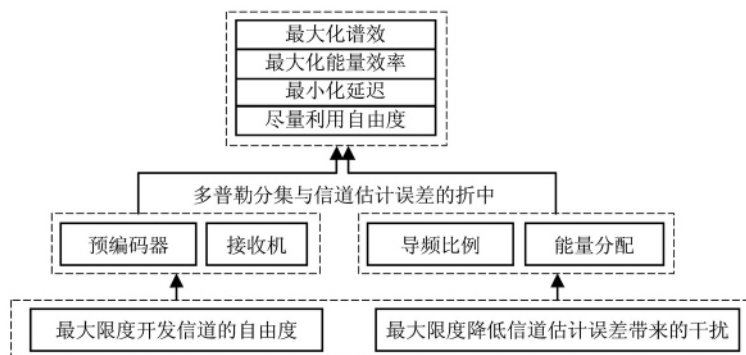


图8 多普勒分集技术概览

Fig. 8 Overall of Doppler diversity transmissions

### 4.1 信道自由度挖掘

文献[55]指出,只有发送、接收联合处理才能最大限度挖掘信道自由度(DoF),从而获得最大分

集增益.发送机采用预编码,将数据符号扩展到整个符号块上传输,以便接收机收集时变信道带来的不同版本;接收机需根据预编码器设计相应均衡算



法,分离或降低符号间的干扰.传统上,通常采用简单重复预编码<sup>[61]</sup>规避符号间的干扰,以期获得多普勒分集性能的上界(反映在误码率上即为下界).然而,实际系统中应采用码率更高的预编码器,例如经典的高范德蒙德预编码器<sup>[56]</sup>或多普勒

域复用(DDM)<sup>[57]</sup>.采用简单重复预编码器时通常可利用最大似然原理设计最优接收机,而实际系统中需采用块反馈均衡(BDFE)、球形译码(SD)等低复杂度均衡器来逼近理论性能.

由表2可见,最大分集阶由信道扩展系数相关

表2 不同信道自由度下的最大多普勒分集阶  
Tab. 2 Doppler diversity order for various systems with different DoF

信道	时间选择性	双选择性	时选 MIMO	双选 MIMO
分集阶	$Q+1$	$(Q+1)(L+1)$	$N_t N_r (Q+1)$	$N_t N_r (Q+1)(L+1)$

矩阵的秩决定,也就是等价于信道在空时频域上的等效自由度的乘积<sup>[55]</sup>.为了更好地利用信道的自由度,文献[56]提出了一种在双选择信道下能同时获得多径和多普勒分集增益的算法,系统可达到最大分集阶 $(L+1)(Q+1)$ , $L$ 代表多径时延.文献[58]在双选择信道下采用扩展 Alamouti 空时块预编码获得(时频空域)全分集增益,获得最大分集阶 $N_t N_r (Q+1)(L+1)$ , $N_t$ 和 $N_r$ 分别表示发送和接收的天线数目.文献[59]指出基于冗余的预编码器(高范德蒙德预编码器)在移动速度快速变化的情况下,需要根据不同速度适配相应长度的冗余,而简单重复预编码和 DDM 预编码具有更高的鲁棒性.

#### 4.2 信道估计误差干扰抑制

在高移动场景,获得及时、准确的信道估计极其困难或代价高昂.经典的多普勒传输技术均基于完备信道估计等假定,而在实际系统设计时必须考虑非完备信道估计误差带来的干扰影响.下面,将分析导频比例和能量分配对非完备信道估计的影响,以及跟多普勒分集传输的误码率、多普勒分集阶、性能损耗的关系,给出设计多普勒分集传输的3个准则.

##### 4.2.1 导频比例对多普勒分集传输的影响

文献[61]指出,多普勒分集和信道估计误差存在折衷关系,快时变带来的移动性增益并非总能利用.图9给出了不同多普勒扩展下,BER与导频比例的对数关系<sup>[61]</sup>.可以看出,信道估计误差对误码性能的影响非常重要,当导频比例较高,信道估计较准确时,系统可获得多普勒分集增益;相反,当导频比例过低,信道估计误差大时,误码性能急剧衰落,系统性能由信道估计误差决定.更高的导频比例意味着更准确的信道估计,但以频谱效率的损失作为代价,因此应根据不同移动速度(或多普勒扩展 $f_D T_s$ )选择适当的导频比例.实际系统为了达

到较好性能,实现多普勒分集传输的第1设计准则为:导频比例 $\delta$ 应大于 $2f_D T_s$ ,即导频对信道的采样应满足奈奎斯特采样率<sup>[61,68]</sup>,图9反映出了这一性能转折点.

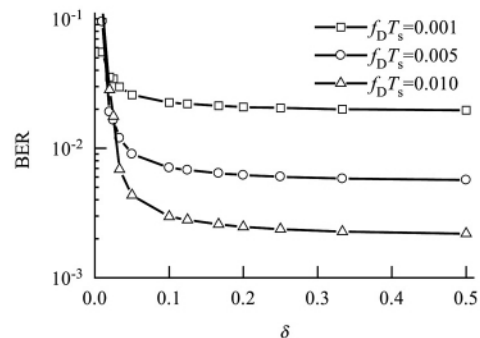


图9 不同多普勒扩展下,BER与导频比例的对数关系

Fig. 9 BER as a function of pilot percentage for various values of  $f_D T_s$

##### 4.2.2 非完备信道估计条件下的多普勒分集阶

除了导频比例,导频和符号传输的能量分配对信道估计和多普勒传输性能也十分相关.为了与完备信道估计下的多普勒分集传输对比,文献[63]用归一化多普勒分集阶和信噪比(SNR)损耗具体量化了信道估计误差和多普勒分集的折衷关系.

用 $\gamma_p$ 和 $\gamma_c$ 分别表示导频和数据符号的SNR,如果

$$\gamma_p = O(\gamma_c^\xi),$$

那么归一化多普勒分集阶,或单位时间上的最大多普勒分集阶可表示为

$$D = \begin{cases} 2f_D \xi, & \xi \leq 1; \\ 2f_D \frac{1}{\xi}, & \xi > 1. \end{cases} \quad (5)$$

由图10可见,当 $\xi=2.0$ 或 $\xi=0.5$ 时,系统分集阶是 $\xi=1.0$ 时的一半,后者的系统多普勒分集阶可达到完备信道估计系统一致的分集阶<sup>[62,63]</sup>.于是,设计多普勒分集传输的第2个准则为:为了



获得最大多普勒分集,导频和数据符号的 SNR 需保持线性关系。

#### 4.2.3 信道估计误差导致的 SNR 性能损耗

由图 10 还可以看出,虽然非完备信道估计下多普勒分集传输仍可达到与假定完备估计时一致的分集阶,但两者始终有不可消除的 SNR 损耗。由此可以得到设计多普勒分集传输的第 3 个准则,当

$$b = \frac{\gamma_c}{\gamma_p} = \sqrt{\frac{1}{(2f_D T_s)} - 1}$$

时,由信道估计误差导致的 SNR 损耗降至最小,系统性能最优<sup>[63]</sup>。相应的,多普勒分集传输在完备和非完备信道估计下的最小差异为

$$20 \lg \left( 1 + \sqrt{\frac{2f_D T_s}{1 - 2f_D T_s}} \right) \text{ (dB)}, \quad (6)$$

式中:  $T_s$  是符号周期;最小差异在

$$\gamma_p = \gamma_c \sqrt{\frac{1}{(2f_D T_s)} - 1}$$

时获得。

图 11 给出了不同多普勒扩展下,最小性能损耗与  $b = \gamma_c / \gamma_p$  的对应关系<sup>[63]</sup>。在给定  $f_D T_s$  下,对应最小 SNR 损耗的最优工作值由“△”标出,最小的 SNR 损耗随着  $f_D T_s$  单调递增。

表 3 总结了设计多普勒分集传输的 3 个准则,根据这 3 个准则,文献[64-65]提出了一种高效、高谱效的多普勒分集传输系统,在高移动环境下可

以达到满意的系统性能。

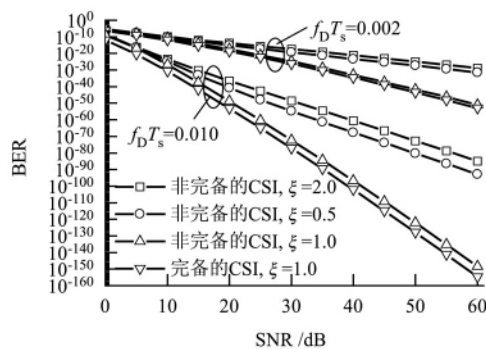


图 10 不同多普勒扩展下, BER 与 SNR 在高信噪比范围内的关系  
Fig. 10 BER versus SNR for various values of  $f_D T_s$  in the high SNR regime

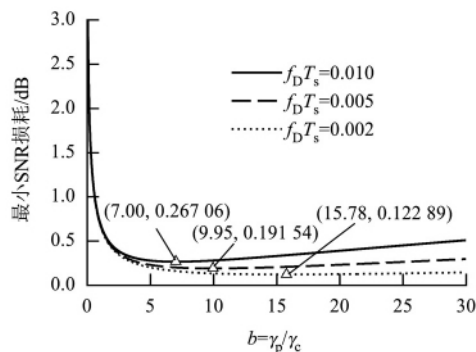


图 11 不同多普勒扩展下, 最小性能损耗与  $b$  的对应关系  
Fig. 11 Minimum SNR loss as a function of  $b$  for various values of  $f_D T_s$

表 3 设计多普勒分集传输的准则

Tab. 3 Criterias of practical design for Doppler diversity transmission

准则和取值	导频比例	分集阶	SNR 损耗/dB
准则	$\delta > f_D T_s$	$\gamma_p \sim \gamma_c$	$b = \gamma_c / \gamma_p \approx \sqrt{1 / (2f_D T_s)} - 1$
取值	满足条件	$2f_D$	$20 \lg \left( 1 + \sqrt{2f_D T_s / (1 - 2f_D T_s)} \right)$

## 5 结论与展望

多普勒效应给高移动场景无线通信系统设计带来严峻挑战,其具体危害表现为载波频率偏移和快时变信道衰落。通过多普勒规划、载波频率校正和多普勒分集技术的联合处理,能够有效地对抗多普勒效应。然而,高移动无线通信抗多普勒效应技术仍然有许多问题需要进一步研究:在未来无线组网中,控制面与数据面分离时,如何进行最佳多普勒规划;如何综合利用多种可用先验信息,以更好地估计/补偿多普勒频移;如何进行复杂环境下的多频移实时估计;如何分析非完备信道下的多普勒分集传输的容量问题;相对多普勒规划和多普勒估

计/补偿,多普勒分集技术尚未广泛应用,故有必要研究其在复杂环境和特定场景下的系统设计与实现技术。

#### 参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会交通运输部. 综合交通网中长期发展规划[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(1): 17-28.  
Department of Transportation of National Development and Reform Commission. Mid and long term development plan of multi-modal transport network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(1): 17-28.
- [2] 李赛飞, 闫连山, 郭伟, 等. 高速铁路信号系统网络安全

- 全与统一管控[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 478-484.
- LI Saifei, YAN Lianshan, GUO Wei, et al. Analysis of network security for Chinese high-speed railway signal systems and proposal of unified security control[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(3): 478-484.
- [3] IMT-2020 (5G) 推进组. 5G 愿景与需求[DB/OL]. [2014-05-30]. <http://www.imt-2020.org.cn/zh>.
- [4] HLAWATSCH F, MATZ G. Wireless communications over rapidly time-varying channels[M]. Oxford: Academic Press, 2011: 1-5.
- [5] 夏云琦. 铁路无线通信技术向 LTE-R 的演进[J]. 中国铁路, 2012(8): 75-76.
- XIA Yunqi. Evolution of wireless communication techniques for railway to LTE-R[J]. Chinese Railway, 2012(8): 75-76.
- [6] WANG Jiangzhou, ZHU Huiling, GOMES N J. Distributed antenna systems for mobile communications in high speed trains[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 675-683.
- [7] FOKUM D T, FROST V S. A survey on methods for broadband internet access on trains[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(2): 171-185.
- [8] ZHOU Yiqing, ADACHI Fumiyuki, WANG Xiaodong, et al. Guest editorial: broadband wireless communications for high speed vehicles[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 673-674.
- [9] FAN Pingzhi, PANAYIRCI E, POOR H V, et al. Special issue on broadband mobile communications at very high speeds[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012(1): 1-3.
- [10] FAN Pingzhi, PANAYIRCI E, LI Ping, et al. Guest editorial: special issue on high mobility wireless communications[J]. Journal of Modern Transportation, 2012, 20(4): 197-198.
- [11] FAN Pingzhi. Editorial: advances in broadband wireless communications under high-mobility scenarios[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 35: 4974-4975.
- [12] GUAN Ke, ZHONG Zhangdui, AI Bo. Assessment of LTE-R using high speed railway channel model[C]// IEEE Communications and Mobile Computing (CMC). [S.l.]: IEEE, 2011: 461-464.
- [13] 李勤. Wi-Fi 免费“上车”门槛何在[N/OL]. 中国科学报, (2014-12-16) [2014-12-30]. <http://tech.hexun.com/2014-12-16/171454707.html>.
- [14] 曹彦平. TD-LTE 技术构建朔黄铁路宽带移动通信系统可行性研究[J]. 铁道通信信号, 2014, 50(4): 68-72.
- CAO Yanping. Feasibility study of constructing the Shuohuang Railway broadband mobile communication system with TD-LTE[J]. Railway Signalling & Communication, 2014, 50(4): 68-72.
- [15] 张敏, 李毅, 舒培炼. 高速铁路列车车厢穿透损耗应用探析[J]. 移动通信, 2011, 35(2): 21-25.
- ZHANG Min, LI Yi, SHU Peilian. Research on penetration loss induced by high speed railway carriage[J]. Mobile Communication, 2011, 35(2): 21-25.
- [16] LIU Liu, TAO Cheng, QIU Jiahui, et al. Position-based modeling for wireless channel on high-speed railway under a viaduct at 2.35 GHz[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(4): 834-845.
- [17] 陈霞, 姚冬苹. 基于 OFDM 的铁路移动通信系统及越区切换方法[J]. 铁道通信信号, 2008, 44(9): 30-34.
- CHEN Xia, YAO Dongping. OFDM based mobile communication system and handover method for railways[J]. Railway Signalling & Communication, 2008, 44(9): 30-34.
- [18] LIU Ziyue, FAN Pingzhi. An effective handover scheme based on antenna selection in ground train distributed antenna systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(7): 3342-3350.
- [19] GOLDSMITH A. Wireless communications[M]. Cambridge: Cambridge university press, 2005: 84-89.
- [20] ZHENG Y R, XIAO Chengshan. Improved models for the generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms[J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(6): 256-258.
- [21] ZHAO Yuping, HAGGMAN S G. Inter-carrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(7): 1185-1191.
- [22] CAI Xiaodong, GIANNAKIS G B. Bounding performance and suppressing inter-carrier interference in wireless mobile OFDM[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(12): 2047-2056.
- [23] JAKES W C, COX D C. Microwave mobile communications[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1994: 13-16.

- [24] GIANNAKIS G B , TEPEDELENLIOGLU C. Basis expansion models and diversity techniques for blind identification and equalization of time-varying channels[J]. Proceedings of the IEEE , 1998 , 86( 10) : 1969-1986.
- [25] 王文清 张晓宁 余翔. 基于虚拟小区的未来无线组网技术[J]. 移动通信 2014( 7) : 64-68.  
WANG Wenqing , ZHANG Xiaoning , YU Xiang. Future wireless networking technology based on virtual cell[J]. Mobile Communications , 2014( 7) : 64-68.
- [26] YAN Li , FANG Xuming , FANG Yuguang. Control and data signaling decoupled architecture for railway wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications , 2015 , 22( 1) : 103-111.
- [27] 王锐. 高速铁路无线覆盖方案研究[J]. 技术与市场 2013( 3) : 26-28.  
WANG Rui. Research on wireless coverage solutions for high-speed railways[J]. Technology and Market , 2013( 3) : 26-28.
- [28] 王琦. 高速移动环境下的无线网络覆盖方法研究[D]. 广州: 华南理工大学 2012.
- [29] 吴端坡. GSM-R 多普勒效应与切换掉话分析及车载分析系统研究[D]. 杭州: 浙江大学 2014.
- [30] 金心宇 吴端坡 吴砥柱. 列车高速运动过程中多普勒频移及误码率分析[J]. 铁道学报 2012 , 34( 4) : 47-50.  
JIN Xinyu , WU Duanpo , WU Dizhu. Analysis on the Doppler frequency offset and error rate during the high-speed running of train[J]. Journal of the Railway Society , 2012 , 34( 4) : 47-50.
- [31] 王伟. 2/3G 融合组网下高速铁路 TD-SCDMA 覆盖策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学 2011.
- [32] DONG Zhicheng , FAN Pingzhi , HU R. et al. On the spectral efficiency of rate and subcarrier bandwidth adaptive OFDM systems over very fast fading channels[DB/OL]. [2015-09-30]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7222473&newsearch=true&queryText=On the Spectral Efficiency of Rate and Subcarrier Bandwidth Adaptive OFDM Systems over Very Fast Fading Channels](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7222473&newsearch=true&queryText=On%20the%20Spectral%20Efficiency%20of%20Rate%20and%20Subcarrier%20Bandwidth%20Adaptive%20OFDM%20Systems%20over%20Very%20Fast%20Fading%20Channels).
- [33] MORELLI M , KUO C , PUN M. Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access ( OFDMA) : a tutorial re view[J]. Proceedings of the IEEE , 2007 , 95( 7) : 1394-1427.
- [34] NEHRA K , SHIKH-BAHAEI M. Spectral efficiency of adaptive MQAM/OFDM systems with CFO over fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2011 , 60( 3) : 1240-1247.
- [35] MERCHED R , YOUSEF N. Efficient Doppler compensation method and receiver for orthogonal frequency division multiplexing ( OFDM ) systems: US , US7424062 B2[P]. 2008-09-09.
- [36] YANG Feng , LI K H , THE K C. A carrier frequency offset estimator with minimum output variance for OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters , 2004 , 8( 11) : 677-679.
- [37] SHI K. Decision-directed fine synchronization for OFDM systems[J]. IEEE Transaction on Communications , 2005 , 53( 3) : 408-412.
- [38] AL-DWEIK A , HAZMI A , YOUNIS S , et al. Carrier frequency offset estimation for OFDM systems over mobile radio channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2010 , 59( 2) : 974-979.
- [39] ROMAN T , KOIVUNEN V. Subspace method for blind CFO estimation for OFDM systems with constant modulus constellations[C] // Proc. IEEE Vehicular Technology Conference ( VTC 2005-Spring) . [S. l. ]: IEEE , 2005 , 2: 1253-1257.
- [40] JAN-JAAP V D B , SANDELL M , BORJESSON P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing , 1997 , 45( 7) : 1800-1805.
- [41] ZHU Jie , LEE W. Carrier frequency offset estimation for OFDM systems with null subcarriers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2006 , 55( 5) : 1677-1690.
- [42] TAO Jun , WU Jingxian , XIAO Chengshan. Estimation of channel transfer function and carrier frequency offset for OFDM systems with phase noise[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2009 , 58( 8) : 4380-4387.
- [43] HSIEH H T , WU W R. Maximum likelihood timing and carrier frequency offset estimation for OFDM systems with periodic preambles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2009 , 58( 8) : 4224-4237.
- [44] TSAI P Y , KANG H Y , CHIUEH T D. Joint weighted least-squares estimation of carrier-frequency offset and timing offset for OFDM systems over multipath fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology , 2005 , 54( 1) : 211-223.
- [45] 王向东 吴正海 郭峰. 一种信号解调方法及装置: 中国 , CN103269259A[P]. 2013-08-28.
- [46] ZHOU Yiqing. Radio environment map based maximum a posteriori Doppler shift estimation for LTE-R [C] // International Workshop on High Mobility

- Wireless Communications ( HMWC ). Beijing: IEEE Press ,2014: 1-5.
- [47] 彭翔, 朱江. 一种频率自动校正方法与装置: 中国, CN1801794A [P]. 2006-07-12.
- [48] 穆鹏程, 殷勤业, 郭伟. 一种高速移动环境下 OFDM 系统的多多普勒频移估计方法: 中国, CN102970270A [P]. 2013-03-13.
- [49] NEVAT I, PETERS G W, DOUCET A, et al. Joint channel and Doppler offset estimation in dynamic cooperative relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13 ( 12 ): 6570-6579.
- [50] ZHOU Yiqing, HOU Zhanwei, PAN Zhengang, et al. Dynamic Doppler tracking for LTE-based broadband communications on high speed rails [C]//IEEE China Summit & Intern. Conf. Signal and Inf. Process. [S. l. ]: IEEE, 2013: 389-393.
- [51] TALBOT S, FARHANG-BOROUJENY B. Time-varying carrier offsets in mobile OFDM [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57 ( 9 ): 2790-2798.
- [52] HUA J, MENG L, XU X, et al. Novel scheme for joint estimation of SNR, Doppler, and carrier frequency offset in double-selective wireless channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58 ( 3 ): 1204-1217.
- [53] YANG Lihua, REN Guangliang, QIU Zhiliang. A novel Doppler frequency offset estimation method for DVB-T system in HST environment [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2012, 58 ( 1 ): 139-143.
- [54] SAYEED A, AAZHANG B. Joint multipath-Doppler diversity in mobile wireless communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47 ( 1 ): 123-132.
- [55] MA Xiaoli, GIANNAKIS G. Maximum-diversity transmissions over time-selective wireless channels [C]// Proceedings of IEEE Wireless Communication Networking Conference. [S. l. ]: IEEE, 2002: 497-501.
- [56] MA Xiaoli, GIANNAKIS G. Maximum-diversity transmissions over doubly selective wireless channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49 ( 7 ): 1832-1840.
- [57] WU Jiangxian. Exploring maximum Doppler diversity by Doppler domain multiplexing [C]// Proceedings of IEEE Global Telecommunication Conference. [S. l. ]: IEEE, 2006: 1-5.
- [58] FANG K, LEUS G. Space time block coding for doubly-selective channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58 ( 3 ): 1934-1940.
- [59] ZHOU Weixi, FAN Pingzhi, WU Jingxian. A spectral efficient precoder for maximum Doppler diversity transmissions over time selective wireless channels [C]//Proc. Intern. Workshop High Mobility Wireless Commun. Chengdu: IEEE, 2012: 113-117.
- [60] BAISSAS M A R, SAYEED A M. Pilot-based estimation of time-varying multipath channels for coherent CDMA receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50 ( 8 ): 2037-2049.
- [61] ZHOU Weixi, WU Jingxian, FAN Pingzhi. Maximizing Doppler diversity transmissions for high mobility systems with imperfect channel state information [C]//Proc. IEEE Intern. Conf. Commun. Sydney: IEEE, 2014: 5920-5925.
- [62] ZHOU Weixi, WU Jingxian, FAN Pingzhi. On the maximum Doppler diversity of high mobility systems with imperfect channel state information [C]//Proc. IEEE Intern. Conf. Commun. London: IEEE, 2015: 4431-4436.
- [63] ZHOU Weixi, WU Jingxian, FAN Pingzhi. High mobility wireless communications with Doppler diversity: fundamental performance limits [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14 ( 12 ): 6981-6992.
- [64] ZHOU Weixi, WU Jingxian, FAN Pingzhi. Spectral efficient Doppler diversity transmissions in high mobility systems with channel estimation errors [C]//Proceeding of IEEE Veh. Technol. Conf. Glasgow: IEEE, 2015: 1-6.
- [65] ZHOU Weixi, WU Jingxian, FAN Pingzhi. Energy and spectral efficient Doppler diversity transmissions in high-mobility systems with imperfect channel estimation [J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2015, 1 ( 5 ): 140-140-12.
- [66] TANG Z, CANNIZZARO R C, LEUS G, et al. Pilot-assisted time-varying channel estimation for OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55 ( 5 ): 2226-2238.
- [67] QU Fengzhou, YANG Liuqing. On the estimation of doubly-selective fading channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9 ( 4 ): 1261-1265.
- [68] SUN Ning, WU Jingxian. Maximizing spectral efficiency for high mobility systems with imperfect channel state information [J]. IEEE Transactions on

Wireless Communications, 2014, 13(3): 1462-1470.

- [69] REN Xiang, CHEN Wen, TAO Meixia. Position-based compressed channel estimation and pilot design for high-mobility OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 1918-1929.

大学客座教授、国际电气与电子工程师学会会士(IEEE Fellow)、国际工程技术学会会士(IET Fellow)、国家杰出青年科学基金获得者、国家级有突出贡献中青年专家、全国优秀博士论文指导教师.

E-mail: pzfan@swjtu.edu.cn

#### 作者简介:



范平志(1955—),博士,1987年起至今任职于西南交通大学,现为信息学院教授,国家级国际联合研究中心(通信与传感网)主任.主要研究方向为高移动宽带无线通信、5G通信关键技术、信息理论与编码、信号设计与处理.主持国家973计划项目(首席科学家)、国家自然科学基金重点项目、国家863计划项目和多项国际科研合作项目.现为英国利兹



周维曦(1986—),博士研究生,2009年获得西南交通大学通信工程学士学位,并于同年开始直接攻读西南交通大学通信与信息系统博士学位.主要研究方向为高移动宽带无线通信下的多普勒分集、信道估计等重要技术.担任国家973计划项目、国家自然科学基金重点项目等科技项目主研.

E-mail: zhouweixister@gmail.com

(中文编辑:唐 晴 英文编辑:周 尧)