

LTE外辐射源雷达帧间模糊带分析与抑制

王本静 易建新* 万显荣 但阳鹏

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: LTE (Long Term Evolution)信号具有大带宽、高覆盖率、强通用性等优点,是一种新型的外辐射源雷达机会照射源。该文从FDD-LTE (Frequency Division Duplexing Long Term Evolution)信号结构入手,探讨了该信号作为第三方机会照射源的模糊函数特性;根据实测FDD-LTE信号,阐述了模糊函数中帧间模糊带抑制的必要性,并对该帧间模糊带的形成机理进行了详细的分析,分析结果表明LTE信号结构中的确定性特征既是引起模糊带的主要因素,同时也是信号相干积累的主要能量来源。对此,该文提出了基于OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)符号子载波系数归一化的帧间模糊带抑制方法,该方法能够在抑制帧间模糊带的同时,又不影响信号相干积累进行目标探测。仿真和实测结果验证了该抑制方法的有效性,为LTE外辐射源雷达目标探测奠定了基础。

关键词: 外辐射源雷达; LTE; 模糊函数; OFDM; 帧间模糊

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)04-0514-09

DOI: 10.12000/JR18025

引用格式: 王本静, 易建新, 万显荣, 等. LTE外辐射源雷达帧间模糊带分析与抑制[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 514-522. DOI: 10.12000/JR18025.

Reference format: Wang Benjing, Yi Jianxin, Wan Xianrong, *et al.*. Inter-frame ambiguity analysis and suppression of LTE signal for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 514-522. DOI: 10.12000/JR18025.

Inter-frame Ambiguity Analysis and Suppression of LTE Signal for Passive Radar

Wang Benjing Yi Jianxin Wan Xianrong Dan Yangpeng

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Long Term Evolution (LTE) is a new type of illuminators of opportunity for passive radars, with the advantages of broad bandwidth, high coverage, and strong generality. In this paper, the ambiguity function of Frequency Division Duplexing Long Term Evolution (FDD-LTE) signal is analyzed as an illuminator of opportunity. According to the measured signal, it was found that it is necessary to suppress the inter-frame ambiguity strips in the ambiguity function. Furthermore, the mechanism of these inter-frame ambiguity strips was analyzed in detail, which revealed that the LTE signal frame structure is the main factor that causes these inter-frame ambiguity strips and is the major energy source of coherent integration. Thus, a method based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) symbol subcarrier coefficient normalization is proposed to suppress these inter-frame ambiguity strips. Simulation and experimental results show that the method can suppress inter-frame ambiguity strips effectively, but does not affect coherent integration, which is the foundation of target detection.

Key words: Passive radar; LTE; Ambiguity function; Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Inter-frame ambiguity

收稿日期: 2018-03-23; 改回日期: 2018-05-21; 网络出版: 2018-06-05

*通信作者: 易建新 jxyi@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502403), 博士后创新人才支持计划(BX201600117), 国家自然科学基金(61701350, 61331012), 湖北省科技支撑项目(2015BCE075), 湖北省自然科学基金(2016CFA061)

Foundation Items: National Key Research and Development Program (2016YFB0502403), Postdoctoral Innovative Talent Support Program (BX201600117), The National Natural Science Foundation of China (61701350, 61331012), Science and Technology Support Project of Hubei Province (2015BCE075), The Natural Science Foundation of Hubei Province (2016CFA061)

1 引言

外辐射源雷达是一种自身不发射电磁波而利用第三方辐射源进行目标探测跟踪的双/多基地雷达系统。该体制雷达具有绿色环保、隐蔽性强、成本较低、易于部署、无需频谱分配等优势^[1]。随着数字信号在全球的日益普及,外辐射源雷达所利用的第三方辐射源主要集中在数字音频信号(DAB)、数字电视信号(DVB-T, DVB-S, CMMB, DTMB)、卫星信号(GNSS)、全球移动通信信号(GSM)、全球微波互联接入信号(WiMAX)、WiFi信号等^[2-10]。近年来,随着第4代移动通信网络的发展,基于LTE(Long Term Evolution)信号的外辐射源雷达成为新体制外辐射源雷达的研究热点。利用LTE信号作为外辐射源进行目标探测具有天然的优势:(1)LTE信号覆盖率高,盲点少,可利用众多LTE基站构成雷达网络,扩展探测范围;(2)LTE信号支持1.4~20 MHz的带宽,其最高距离分辨率可达7.5 m,相较于DAB和GSM等窄带信号,LTE信号具有较高的距离分辨率^[11];(3)LTE信号采用OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术,具有良好的抗多径能力,能够降低接收机均衡复杂度^[1]。

第三方辐射源信号波形并非专门针对雷达探测而设计,其是否适合作为雷达波形,需要对辐射源信号的模糊函数(Ambiguity Function, AF)进行严格的分析。美国莱特州立大学的Aaron Evers以及马来西亚博特拉大学的Asem A. Salah等人研究了LTE信号的模糊函数,并对其中部分典型副峰的产生机理进行了分析,初步论证了LTE信号作为机会照射源的可行性^[12-16]。

LTE信号作为机会照射源具有独特的优势,其中包含的确定性特征既可用于外辐射源雷达接收机的同步和信道估计,也可用于外辐射源雷达目标探测,但信号结构中的确定性特征也不可避免地会引起模糊副峰。模糊副峰的存在会产生虚警,甚至遮蔽弱小目标的主峰。其中,模糊副峰中的帧间模糊带是制约目标探测的重要因素,但现有国内外文献^[12-18]对此鲜有提及。

目前,模糊副峰抑制一般采用将信号帧结构中不影响信号相干积累的确定性特征置零或随机化等常规方法^[10,19]。但LTE信号帧结构比较复杂,其中的确定性特征相较于用户数据,占有较高的比重。因此,LTE信号帧结构中的确定性特征将是相干积累的主要能量来源。若将LTE信号中的确定性特征置零或随机化,则不利于信号相干积累进行目标探测。本文所提方法可以有效解决这一冲突,在抑制

由确定性特征引起的帧间模糊副峰的同时,又不影响信号相干积累进行目标探测。

本文从频分复用(Frequency Division Duplexing, FDD)传输模式下LTE下行信号的帧结构出发,首先介绍了信号的物理层特征,在此基础上分析了FDD-LTE下行信号作为外辐射源照射源的模糊函数特点,率先研究了帧间模糊带的产生机理,并提出抑制方法,最后通过仿真和实测数据验证了该方法的有效性。

2 LTE信号概述

LTE是由3GPP(3rd Generation Partnership Project)组织制定的通用移动通信系统技术标准的长期演进。LTE系统引入了OFDM技术和MIMO(Multiple Input Multiple Output)技术,显著增加了频谱效率和数据传输速率。根据通信服务环境的需求,LTE支持多种带宽配置,包括1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz和20 MHz。根据双工方式的不同,LTE系统分为FDD-LTE和TDD-LTE(Time Division Duplexing Long Term Evolution)^[20]。其中,FDD-LTE系统上下行采用分离的对称频段接收和发送数据;TDD-LTE系统使用相同的频段在不同的时隙上接收和发送数据。本文主要针对FDD-LTE信号展开研究。

2.1 信号帧结构

信号帧结构定义了LTE系统最基本的传输时序,系统中的数据以无线帧为单位传输。FDD-LTE信号的1个无线帧长为10 ms,每个无线帧包含10个长度为1 ms的子帧,每个子帧由2个长度为0.5 ms的时隙组成。为了有效对抗各种通信环境下的多径影响,LTE支持两种不同类型的循环前缀(Cyclic Prefix, CP)。每个时隙根据CP的不同所包含的OFDM符号数目也不同。对于普通型CP,每个时隙包含7个OFDM符号,而对于扩展型CP,每个时隙则由6个OFDM符号组成。图1给出了普通型循环前缀下FDD-LTE信号帧结构,其中, T_g 为循环前缀时长, T_0 为数据体时长。

2.2 物理资源结构

FDD-LTE下行物理资源结构具有时间、频率和空间3个维度。其中,空间维度的复用由MIMO技术实现,时频维度可借助图2所示的资源栅格进行说明。资源栅格由物理资源块(Resource Block, RB)组成。对于普通型CP,每个物理资源块由时域上1个时隙和频域上12个连续的子载波构成。资源栅格上的最小单元称为资源元素(Resource Element, RE),其作为数据传输的最小单位,映射的是某一时域的OFDM符号在频域的某个子载波上所携带的数

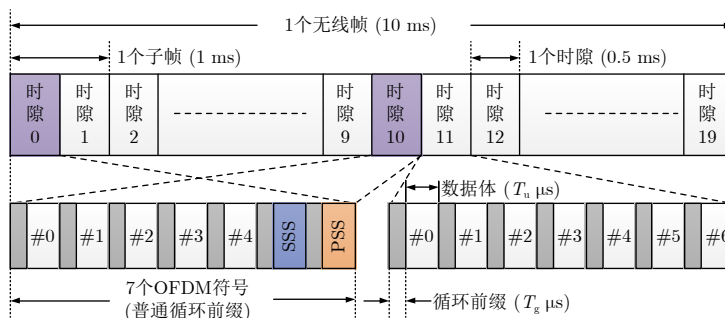


图1 FDD-LTE信号帧结构

Fig. 1 FDD-LTE signal frame structure

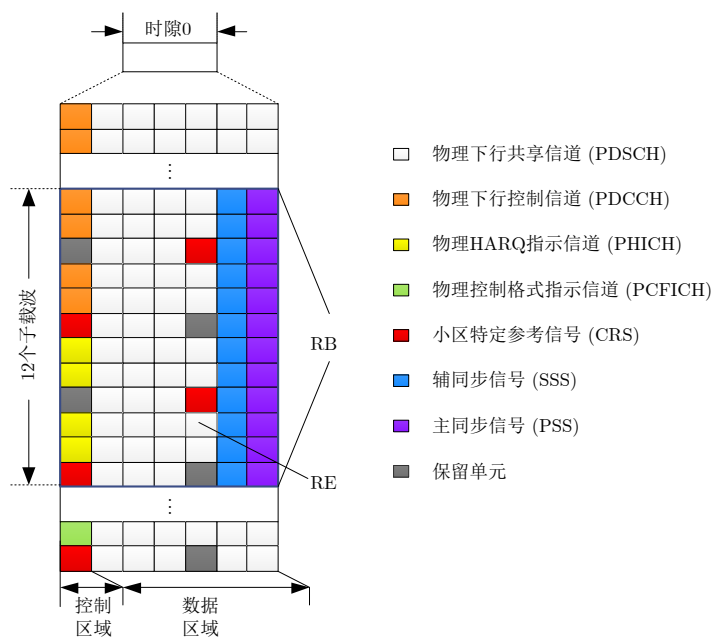


图2 FDD-LTE下行资源栅格

Fig. 2 FDD-LTE downlink resource grid

据。对于特定的物理资源块，固定位置的资源元素具有特殊用途，如加载参考信号、同步信号、系统信息和控制信息等，剩余资源元素被用于传输用户数据。

2.3 下行物理层信号

LTE下行物理层信号是由来自上层的输入码流经过信道编码、加扰、调制、层映射、预编码、资源单元映射后进行OFDM调制得到^[21]。调制后的信号加入CP形成物理层信号帧，再经过基带至射频变换后发射。LTE下行物理层信号主要包括物理信道和物理信号。其中物理信道主要包括：物理下行共享信道(PDSCH)、物理广播信道(PBCH)、物理控制格式指示信道(PCFICH)、物理下行控制信道(PDCCH)以及物理混合自动重发请求指示信道(PHICH)；物理信号主要包括小区特定参考信号(CRS)、主同步信号(PSS)和辅同步信号(SSS)。

上述物理层信号按照一定的规则映射到下行资源栅格中^[21]，其在资源栅格中的位置如图2所示，

其中，控制区域主要包含控制信息，数据区域主要包含用户信息。为了获得更加清晰宏观的认识，图3展示了实测FDD-LTE下行信号的时频资源图。其中，广义控制信道信号(PCFICH, PDCCH, PHICH)主要位于偶数时隙的第0个OFDM符号，对应于A类明条纹。小区特定参考信号(CRS)散布于整个频域，占据每个时隙的第0、第4个OFDM符号，对应于A类和B类明条纹。

图3中呈现出规律性明暗交替的原因是，位于每个时隙第0、第4个OFDM符号的CRS具备较高的能量分配比例，无论是否有用户接入都处于持续发送状态，且偶数时隙的第0个OFDM符号除了CRS还包含有控制信息，因此呈现出亮度不同的A类和B类明条纹；而当小区接入用户量较少时，PDSCH大部分资源元素处于空闲状态，因此呈现出暗条纹。所以，可以仅利用FDD-LTE信号中包含有某些确定性特征的部分OFDM符号进行目标探测。

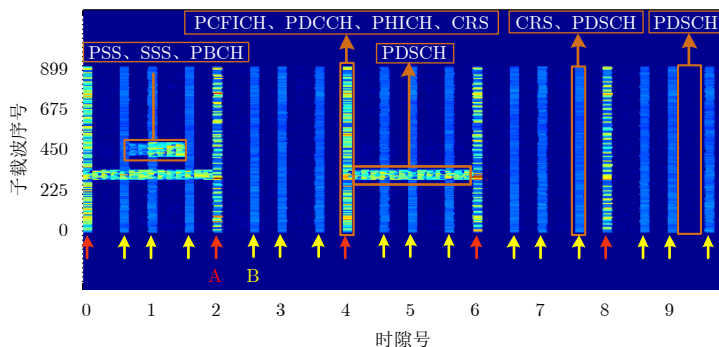


图 3 实测FDD-LTE下行信号时频资源图

Fig. 3 Time-frequency resource map of the measured FDD-LTE downlink signal

3 LTE信号模糊函数分析

模糊函数作为分析和衡量辐射源信号的有力工具, 其特性决定了外辐射源雷达系统采用的第三方辐射源所具有的目标分辨率、量测精度、模糊度以及杂波抑制能力, 其计算表达式为:

$$|A(\tau, f_d)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)s^*(t-\tau)e^{-j2\pi f_d t} dt \right| \quad (1)$$

其中, $s(\tau)$ 为信号复包络, τ 为时延, f_d 为多普勒频移。图4为实测FDD-LTE信号的模糊函数。从图4中可以看出, FDD-LTE信号模糊函数除了具有图钉型结构以外, 还存在多种模糊副峰以及多普勒维100 Hz模糊带。该模糊带沿距离维扩展, 在多普勒维呈100 Hz周期性。这些模糊副峰和模糊带以无线帧为单位分为帧内模糊和帧间模糊。其中, 帧内模糊主要是由无线帧内特定信号, 如控制信号、循环前缀等的重复性引起; 帧间模糊则由各无线帧间特定信号, 如同步信号、参考信号、系统信息等的重复性导致^[11]。现有文献详细分析了帧内模糊副峰存在的位置和产生原因, 但对于帧间模糊的分析仅限于时延维, 并没有考虑帧间特定信号的重复性导致的多普勒维100 Hz模糊带。本节在简要列举FDD-LTE

信号模糊函数典型副峰的同时, 解释了帧间模糊带抑制的必要性, 并对其产生机理进行了重点分析。

3.1 LTE信号典型模糊副峰

表1列举了文献[12-18]中FDD-LTE信号模糊函数的一些典型副峰及其产生原因。虽然模糊副峰会致虚警, 但并非所有模糊副峰都影响目标探测。例如, 在室内或市区环境中, 根据双基地雷达方程推算, LTE单基站对雷达散射截面积为10 m²的目标有效探测范围在5 km左右^[17]。基于此, 由循环前缀产生的帧内模糊副峰、CRS及同步信号产生的帧间模糊副峰均远超出该探测范围。同时, 由于LTE单基站对目标有效探测范围有限, LTE信号比较适合用来对慢速目标(如车辆, 人群, 低慢小航空器等速度小于200 km/h的目标)进行探测。而由控制区域信号周期性产生的帧内模糊副峰在1 kHz的整数倍处^[4]。在目前国内FDD-LTE频段(1.8 GHz, 2.1 GHz)下, 1 kHz对应的双基速度不小于166.7 m/s, 远超出慢速目标的速度上限, 也可不予考虑。

但帧间模糊带的存在会对慢速目标的探测产生不利影响。任取图4(b)中帧间模糊带上的一点[0.0347 ms, 300 Hz], 计算得到该点相对于基底的

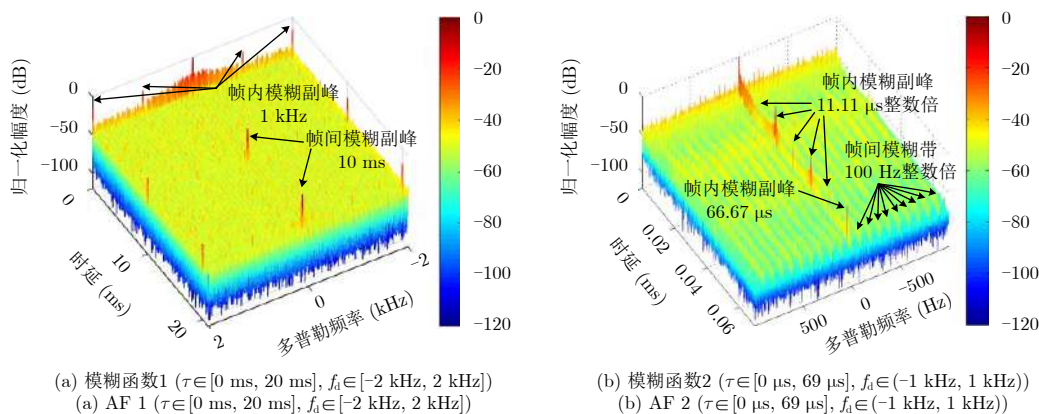


图 4 实测FDD-LTE信号模糊函数

Fig. 4 AF of the measured FDD-LTE signal

表 1 FDD-LTE信号模糊函数典型副峰

Tab. 1 Typical ambiguity peaks in the AF of the FDD-LTE signal

	副峰位置	产生原因
帧内模糊	66.67 μs	循环前缀
	11.11 μs 整数倍	CRS
	1 kHz整数倍	控制区域信号
	2 kHz整数倍	CRS
帧间模糊	10 ms	CRS及同步信号

功率比为18.5158 dB。雷达目标检测一般采用恒虚警算法,在虚警率为 10^{-6} 时,检测概率达0.9要求目标的信噪比为13 dB左右^[22]。当帧间模糊带的峰值基底比大于该检测门限时,模糊带的存在会遮蔽该区域的弱目标,影响目标检测。

3.2 帧间模糊带产生机理

在FDD-LTE模糊函数中,由于长时间相干积累,帧结构中确定性特征的帧间周期性导致的多普勒维100 Hz模糊带是制约慢速目标探测的重要因素。本节结合模糊函数表达式对该帧间模糊带的产生机理进行分析。

模糊函数的计算有多种方法^[23],本文采用“距离维相关+多普勒维离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)”的快速算法。为简化分析,假定相干积累时间 $T_c = N_b T_0$,其中, N_b 为无线帧个数, $T_0 = 10$ ms为无线帧长。将每个连续时间的无线帧信号离散后分为 L 段,每段长度设为 N ,则相干积累时间内包含 $M = N_b L$ 个子段。离散后的模糊函数表达式可表述如下:

$$\chi[d, p] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N_c-1} x_m[n] x_m^*[n-d] e^{-j2\pi \frac{p}{M} m} \quad (2)$$

其中, $x_m[n]$ 为第 m 段时域信号, N_c 为线性相关的长度($N_c < N$), d 为时延, p 为多普勒频移。由式(2)可以看出,模糊函数的计算包括以下2个步骤:

步骤1 距离维相关

将每个子段长度为 N 的时域信号,在距离维做相关,即

$$\eta_m[d] = \sum_{n=0}^{N_c-1} x_m[n] x_m^*[n-d] \quad (3)$$

FDD-LTE下行信号帧结构中具有帧间周期性的确定性特征除了同步信号和系统信息外,还包括每个时隙中可用于目标探测的第0个和第4个OFDM符号中的CRS和广义控制信道信号(PCFICH, PHICH, PDCCH)。当小区的物理层标识(PCI)确定时,CRS在每个无线帧的资源栅格中的位置是固定不变的,且与CRS相关的扰码序列仅与时隙号和

每个时隙内OFDM符号的序号相关,因此CRS会表现出帧间周期性。当小区内的用户数量和通信环境在短时保持稳定的情况下,控制区域的某些信号,如PCFICH以及PHICH等,也会表现出帧间周期性。因此,针对这些以无线帧为重复周期的特定成分,在相同的时延单元有

$$\eta_m[d] = \eta_{m+L}[d] \quad (4)$$

由式(4)可以看出距离维相关结果在多普勒维表现出周期性;

步骤2 多普勒维DFT

对距离维相关结果在多普勒维做DFT,则LTE信号的模糊函数可表示为:

$$\begin{aligned} \chi[d, p] &= \sum_{n=0}^{N_b-1} e^{-j2\pi \frac{L n}{M} p} \sum_{m=0}^{L-1} \eta_m[d] e^{-j2\pi \frac{m}{M} p} \\ &= \frac{\sin(\pi L N_b p / M)}{\sin(\pi L p / M)} \cdot \sum_{m=0}^{L-1} \eta_m[d] e^{-j2\pi \frac{m}{M} p} \end{aligned} \quad (5)$$

此时,模糊函数在多普勒维表现出周期性峰值,峰值位置由式(5)右侧第1项乘积因子决定。由该因子性质可知,其峰值在 $p = M/L$ 的整数倍处,对应多普勒频率为 f_p 的整数倍,其中:

$$f_p = p \Delta f = \frac{M}{L} \cdot \frac{1}{T_c} = 100 \text{ Hz} \quad (6)$$

其中, $\Delta f = 1/T_c$ 为多普勒分辨率。

由上述推导得出,多普勒维100 Hz帧间模糊带主要是由FDD-LTE信号帧结构中的确定性特征的10 ms帧间周期性引起。该周期性使距离维的相关结果 $\eta_m[d]$ 在多普勒维表现出周期性,进而使模糊函数在多普勒维上产生周期性的峰值,从而形成一系列模糊带。

4 LTE信号帧间模糊带抑制

由前述分析可知,距离维的相关结果 $\eta_m[d]$ 在多普勒维的周期性是帧间模糊带产生的主要原因。如果能够消除这种周期性,即可使帧间模糊带消失,进而提高LTE外辐射源雷达对慢速目标的探测能力。本节将结合FDD-LTE信号特点,采用OFDM符号子载波系数归一化的方法,消除 $\eta_m[d]$ 在多普勒维上的周期性,实现对帧间模糊带的抑制。

4.1 基于子载波系数归一化的帧间模糊带抑制

LTE采用了OFDM技术,信号可由时域多个OFDM符号组成。第 m 个OFDM符号可表示为:

$$x_m[n] = \sum_{k=0}^{K-1} c_{mk} e^{j2\pi \frac{k}{N_u} (n - N_g)} \quad (7)$$

其中, $k \in [0, \dots, K-1]$ 为子载波索引, c_{mk} 为第 m

个OFDM符号的第 k 个子载波系数, N_g, N_u 分别为循环前缀和OFDM数据体长度。则LTE基带信号 $x[n]$ 可由 M 个OFDM符号首尾相连得到, 即

$$x[n] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{K-1} c_{mk} e^{j2\pi \frac{k}{N_u} (n - mN_c - N_g)} \quad (8)$$

其中, $N_c = N_g + N_u$ 为一个OFDM符号长度。此时将时域信号以OFDM符号为单位分成 M 块, 每块长度为 N_c ^[24], 将式(7)代入式(3), 可得

$$\begin{aligned} \eta_m[d] &= \sum_{n=0}^{N_c-1} x_m[n] x_m^*[n-d] \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{K-1} c_{mk} e^{j2\pi \frac{k}{N_u} N_g} c_{ml}^* e^{j2\pi \frac{l}{N_u} (d + N_g)} \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^{N_c-1} e^{j2\pi \frac{n}{N_u} (k-l)} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, N_c 表示线性相关的长度(时延 d 较大时, N_c 可能小于OFDM数据体长度 N_u)。当 $d < N_g$ 时, 取相关长度 $N_c = N_u$, 利用OFDM符号子载波之间的正交性, 化简可得

$$\eta_m[d] = N_u \sum_{k=0}^{K-1} |c_{mk}|^2 e^{j2\pi \frac{k}{N_u} d} \quad (10)$$

当 $K = N_u$ 时, 式(10)相当于对 $|c_{mk}|^2$ 做逆离散傅里叶变换。将式(10)代入式(2)可得

$$\chi[d, p] = N_u \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j2\pi \frac{p}{M} m} \sum_{k=0}^{K-1} |c_{mk}|^2 e^{j2\pi \frac{k}{N_u} d} \quad (11)$$

由式(10)可知, 当采用BPSK或QPSK调制时, OFDM符号子载波系数模值 $|c_{mk}|$ 恒为1, 此时 $\eta_m[d]$ 为常数。式(11)在多普勒维DFT后不会出现一系列模糊峰值, 此时帧间模糊带消失。

FDD-LTE下行信号中, CRS和广义控制信道信号(PCFICH, PHICH, PDCCH)采用的调制方式为QPSK或BPSK, 具体信息如表2所示。然而, 在实际通信环境中, 尽管每个PHICH都采用BPSK的调制方式, 但是极可能存在多个用户的PHICH叠

表2 下行物理信道及物理信号的调制方式

Tab. 2 Modulation modes of the downlink physical channels and physical signal

物理信道及物理信号	调制方式
CRS	QPSK
PCFICH	QPSK
PHICH	BPSK
PDCCH	QPSK

加的情况, 相关子载波系数模值为变量, 距离维相关结果在多普勒维仍会表现出周期性, 为消除该周期性, 可将子载波系数进行归一化, 即

$$\bar{c}_{mk} = \frac{c_{mk}}{|c_{mk}|^2} \quad (12)$$

此时, 将式(12)代入式(9), 当 $d < N_g, N_c = N_u$ 时, 得

$$\eta_m[d] = \sum_{k=0}^{K-1} c_{mk} \frac{c_{mk}^*}{|c_{mk}|^2} e^{j2\pi \frac{k}{N_u} d} = N_u \sum_{k=0}^{K-1} e^{j2\pi \frac{k}{N_u} d} \quad (13)$$

可以发现, 距离维相关结果 $\eta_m[d]$ 经子载波归一化后与 m 无关, 在多普勒维上不再表现出周期性, 帧间模糊带消失。上述的讨论, 主要针对 $d < N_g$ 的情况, 当 $d \geq N_g$ 时, 用循环相关取代线性相关, 可以取得类似的结果^[25]。

4.2 仿真与实测分析

为验证上述方法对帧间模糊带抑制的有效性, 该部分给出仿真和实测结果。根据第2节分析, 仿真和实测信号均针对每个时隙的第0个和第4个OFDM符号, 为简化操作, 信号中仅包含表2中所示的CRS和广义控制信道信号, 仿真参数见表3。

表3 FDD-LTE信号仿真参数

Tab. 3 Parameters used for the simulated FDD-LTE signal

参数	数值
采样率	23.04 MHz
带宽	15 MHz
子载波间隔	15 kHz
OFDM符号数据体长度	66.67 μ s
循环前缀长度	4.69/5.12 μ s
无线帧数	50
信噪比	25 dB
PCI	0
控制格式指示信息CFI	1
PHICH组内用户数量	3

仿真信号经过子载波系数归一化前后的模糊函数分别如图5(a)、图5(b)所示, 实测信号经过子载波系数归一化前后的模糊函数分别如图5(c)、图5(d)所示。结果均表明经过帧间模糊抑制后, 模糊函数中100 Hz帧间模糊带消失, 证明该方法能够有效抑制帧间模糊带。

为验证该方法对目标探测的影响, 下面从仿真角度进行分析和说明。将仿真信号作为参考信号, 在其中加入多径杂波和目标后构成监测信号, 其中, 监测信号中各成分信息见表4, 相干积累时间为0.5 s, 积累增益约64.87 dB, 则相干积累后目标信噪比约

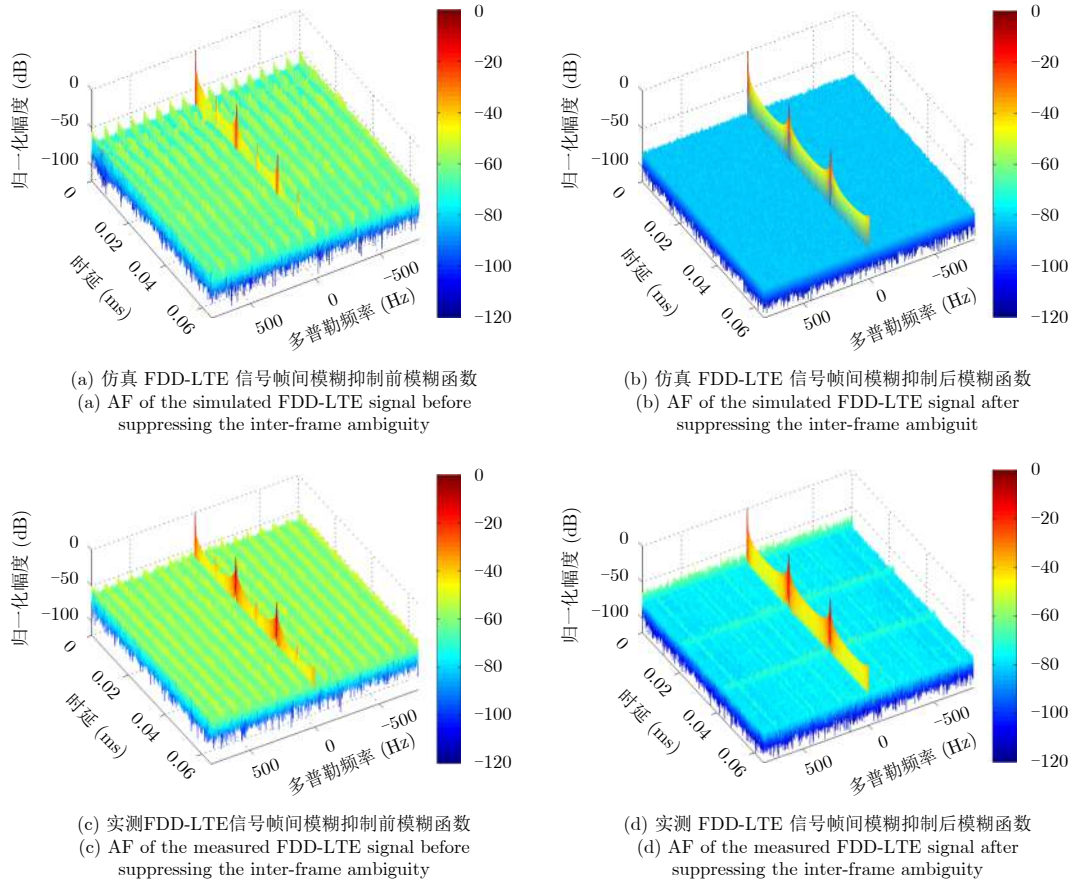


图 5 FDD-LTE信号帧间模糊抑制前后的模糊函数

Fig. 5 AF of the FDD-LTE signal before and after suppressing the inter-frame ambiguity

表 4 多径和目标仿真参数

Tab. 4 Parameters used for the simulated the multipath and target

	多径杂波	目标
距离元	[0, 1, 2, 5, 9]	30
多普勒频率(Hz)	[0, 0, 0, 0, 0]	100
信噪比(dB)	[25, 20, 15, 10, 5]	-20

为44.87 dB。帧间模糊抑制前后距离多普勒(Range-Doppler, RD)谱分别如图6(a)、图6(b)所示,可以明显看出,经过帧间模糊抑制后距离多普勒谱中的模糊带消失,即使目标刚好落在模糊带上也能够凸显出来。抑制后目标的信噪比约为44.06 dB,这表明与实际目标信噪比相当,该方法能够在抑制帧间模糊带的同时,基本不影响信号相干积累和目标探测。

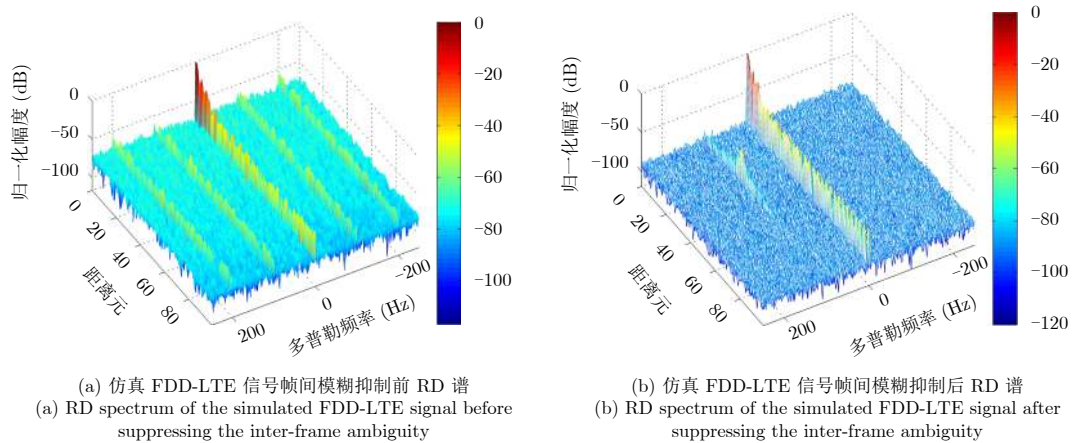


图 6 仿真FDD-LTE信号帧间模糊抑制前后RD谱

Fig. 6 RD spectra of the FDD-LTE simulated signal before and after suppressing the inter-frame ambiguity

5 结束语

文章首先介绍了FDD-LTE信号的物理层特征,接着研究了FDD-LTE信号的模糊函数特性,总结了模糊函数中一些典型副峰的产生原因,并率先分析了帧间模糊带的形成机理。分析表明,FDD-LTE信号帧结构中具有帧间周期性的确定性特征,如CRS和广义控制信道信号等使距离维的相关结果产生周期性,该周期性是引起帧间模糊带的主要原因。针对该模糊带,结合LTE信号的OFDM特性,本文提出了基于子载波系数归一化的帧间模糊带抑制方法。仿真和实测结果表明,该方法能够有效抑制帧间模糊带,为基于FDD-LTE信号的外辐射源雷达目标探测奠定了基础。

参考文献

- [1] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 109–123. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20027](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20027).
Wan Xian-rong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109–123. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20027](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20027).
- [2] Poullin D. Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 143–152. DOI: [10.1049/ip-rsn:20045017](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20045017).
- [3] Tao R, Gao Z W, and Wang Y. Side peaks interference suppression in DVB-T based passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3610–3619. DOI: [10.1109/TAES.2012.6324746](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6324746).
- [4] 金威, 吕晓德, 向茂生. 基于DVB-S信号的外辐射源雷达的模糊函数及分辨特性分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 380–386. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20077](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20077).
Jin Wei, Lü Xiao-de, and Xiang Mao-sheng. Ambiguity function and resolution characteristic analysis of DVB-S signal for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 380–386. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20077](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20077).
- [5] Wan X R, Yi J X, Zhao Z X, *et al.* Experimental research for CMMB-based passive radar under a multipath environment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 70–85. DOI: [10.1109/TAES.2013.120737](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120737).
- [6] 万显荣, 唐慧, 王俊芳, 等. DTMB外辐射源雷达参考信号纯度对探测性能的影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 725–729. DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.08).
Wan Xian-rong, Tang Hui, Wang Jun-fang, *et al.* Influence of reference signal purity on target detection performance in DTMB-based passive radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 725–729. DOI: [10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.08](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.08).
- [7] Ma H, Antoniou M, Pastina D, *et al.* Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(1): 115–130. DOI: [10.1109/TAES.2017.2739900](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2739900).
- [8] 陈刚, 王俊, 王珏, 等. GSM信号外辐射源雷达同频干扰抑制方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2017, 44(6): 37–42. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.06.007).
Chen Gang, Wang Jun, Wang Yu, *et al.* Method of co-channel interference cancellation for the GSM based PBR[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2017, 44(6): 37–42. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.06.007).
- [9] Wang Q, Hou C P, and Lu Y L. An experimental study of WiMAX-based passive radar[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(12): 3502–3510. DOI: [10.1109/TMTT.2010.2080630](https://doi.org/10.1109/TMTT.2010.2080630).
- [10] 饶云华, 朱逢园, 张修志, 等. WiFi外辐射源雷达信号模糊函数及副峰抑制分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 225–231. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20061](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20061).
Rao Yun-hua, Zhu Feng-yuan, Zhang Xiu-zhi, *et al.* Ambiguity function analysis and side peaks suppression of WiFi signal for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 225–231. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2012.20061](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20061).
- [11] 汪清, 侯春萍, Lu Yi-long. 基于移动WiMAX的被动雷达信号分析及模糊函数性质研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2226–2228, 2231. DOI: [10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.065](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.065).
Wang Qing, Hou Chun-ping, and Lu Yi-long. Signal structure and ambiguity function features of mobile WiMAX based passive radar[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(6): 2226–2228, 2231. DOI: [10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.065](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.065).
- [12] Evers A and Jackson J A. Cross-ambiguity characterization of communication waveform features for passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 3440–3455. DOI: [10.1109/TAES.2015.140622](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140622).
- [13] Evers A and Jackson J A. Analysis of an LTE waveform for radar applications[C]. Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, OH, USA, 2014: 200–205.
- [14] Salah A A, Abdullah R S A R, Ismail A, *et al.* Feasibility study of LTE signal as a new illuminators of opportunity for passive radar applications[C]. Proceedings of 2013 IEEE International RF and Microwave Conference, Penang, Malaysia, 2016: 258–262. DOI: [10.1109/RFM.2013.6757261](https://doi.org/10.1109/RFM.2013.6757261).
- [15] Abdullah R S A R, Salah A A, Ismail A, *et al.* Experimental investigation on target detection and tracking in passive radar using long-term evolution signal[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(3): 577–585. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0346](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0346).
- [16] Salah A A, Abdullah R S A R, Ismail A, *et al.*

- Experimental study of LTE signals as illuminators of opportunity for passive bistatic radar applications[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(7): 545–547. DOI: [10.1049/el.2014.0237](https://doi.org/10.1049/el.2014.0237).
- [17] 黄威振. 基于4G基站信号的被动雷达相关技术研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2016: 27–29.
- Huang Wei-zhen. Research on passive radar related technique based on 4G base station signal[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 27–29.
- [18] Wang Q, Huang S, Yang J Y, *et al.* Waveform Analysis of LTE Signal for Passive Radar Application[M]//Zu Q H, Vargas-Vera M, and Hu B. *Pervasive Computing and the Networked World*. Cham: Springer, 2013: 632–642.
- [19] 万显荣, 岑博, 程丰, 等. 基于CMMB的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(10): 2489–2493. DOI: [10.3742/SP.J.1146.2011.00147](https://doi.org/10.3742/SP.J.1146.2011.00147).
- Wan X R, Cen Bo, Cheng Feng, *et al.* Ambiguity function analysis and processing of CMMB signal based passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2489–2493. DOI: [10.3742/SP.J.1146.2011.00147](https://doi.org/10.3742/SP.J.1146.2011.00147).
- [20] Zyren J. Overview of the 3GPP long term evolution physical layer[R]. Austen: Freescale Semiconductor, 2007.
- [21] ETSI. Physical Channels and Modulation[M]. 3GPP TS 36.211 V13.2.0. Nice: ETSI.
- [22] Richard M A著. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 262–279.
- Richard M A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*[M]. Tran. Xing Meng-dao, Wang Tong, Li Zhen-fang, *et al.* Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 262–279.
- [23] Petri D. Definition and analysis of homeland security systems based on software defined passive radars[D]. [Ph.D. dissertation], University of Pisa, 2011: 41–51.
- [24] Fang L, Wan X R, Fang G, *et al.* Passive detection using orthogonal frequency division multiplex signals of opportunity without multipath clutter cancellation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(3): 516–524. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0238](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0238).
- [25] Searle S, Palmer J, Davis L, *et al.* Evaluation of the ambiguity function for passive radar with OFDM transmissions[C]. *Proceedings of 2014 IEEE Radar Conference*, Cincinnati, OH, USA, 2014: 1040–1045. DOI: [10.1109/RADAR.2014.6875747](https://doi.org/10.1109/RADAR.2014.6875747).

作者简介



王本静(1991–), 女, 河南信阳人, 武汉大学电子信息学院在读硕士研究生, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理。
E-mail: benjingw@whu.edu.cn



万显荣(1975–), 男, 湖北天门人, 武汉大学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新体制雷达设计, 如外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理。
E-mail: xrwan@whu.edu.cn



易建新(1989–), 男, 湖南永州人, 武汉大学博士, 研究方向为外辐射源雷达信号处理、目标跟踪和信息融合。
E-mail: jxyi@whu.edu.cn



但阳鹏(1993–), 男, 湖北仙桃人, 武汉大学电子信息学院在读博士研究生, 研究方向为外辐射源雷达信号处理。
E-mail: ypd@whu.edu.cn