

基于LTE信号的外辐射源雷达副峰特性及抑制方法研究

吕晓德^{①②} 张汉良^{*①②③} 杨璟茂^{①②③} 岳琦^{①②③}

^①(中国科学院大学电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 针对基于LTE信号的外辐射源雷达, 首先根据LTE信号结构分析了其模糊函数的特性, 解释了不同类型副峰的产生机理。然后, 针对对探测性能有影响的两类副峰, 提出相应的抑制算法: 对于循环前缀副峰, 提出数据非连续分块的快速互模糊算法; 对于频谱不连续产生的副峰, 提出频带合成和频域加窗的抑制算法。最终通过两种抑制算法的综合处理, 得到LTE信号图钉状的模糊函数。该文工作为基于LTE信号的外辐射源雷达副峰抑制提供了新的方法。

关键词: 外辐射源雷达; LTE信号; 模糊函数; 副峰抑制

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2498-08

DOI: 10.11999/JEIT180019

Research on Characteristics and Suppression Methods of Side Peaks of Passive Radar Based on LTE Signal

LÜ Xiaode^{①②} ZHANG Hanliang^{①②③} YANG Jingmao^{①②③} YUE Qi^{①②③}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China*)

^③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: For the passive radar based on Long Term Evolution (LTE) signal, firstly, the ambiguity function are analyzed, and the producing mechanism of different side peaks are explained. Then, a series of corresponding suppression algorithms are proposed for two types of side peaks degrading detection performance: For the side peaks caused by the cyclic prefix, a fast ambiguity algorithm based on non-continuous chunking of data is proposed; For the side peaks caused by the non-continuous spectrum, the suppression algorithm of bandwidth synthesis and frequency domain windowed is proposed. Finally, the thumbtack ambiguity function of the LTE signal is obtained through integrated processing of two suppression algorithms. The work of this paper provides a new method for the side peaks suppression of the passive radar based on the LTE signal.

Key words: Passive radar; Long Term Evolution (LTE) signal; Ambiguity function; Side peaks suppression

1 引言

外辐射源雷达(无源雷达)是一种利用第三方发射的非合作信号进行目标探测的双/多基地雷达系统^[1], 其优势在于: (1)自身不发射电磁波, 无需大功率发射设备, 造价相对低廉; (2)无需新的频率分配, 不增加环境中的电磁辐射, 对环境无污染; (3)具有较好的“四抗”特性^[2]。由于第三方发射的信号为非合作信号, 所以外辐射源雷达系统通常包括1个参考通道和1个或多个监测通道, 对参考通道的直达波和监测通道的目标回波信号进行互模糊运

算来获取目标的距离和速度信息。

LTE (Long Term Evolution)信号为第4代移动通信技术(4 G)所使用的无线通信信号是一种全世界范围内广泛分布的通信信号^[3,4]。相对于调频广播或者模拟/数字电视信号的外辐射源信号而言, LTE信号有着以下优势: (1)LTE信号发射基站十分丰富, 有天然的网络协同探测优势, 可利用多个发射基站形成一个外辐射源雷达组网系统, 从而提高对目标的探测能力; (2)LTE标准采用正交频分复用多址、MIMO技术以及灵活的带宽配置实现高速率数据传输, 其最大频谱宽度为20 MHz, 和其他信号相比频带宽度更宽, 有着更高的距离分辨率。

LTE信号是拥有国际标准的通信信号, 有着特

定的编码和调制方式，对信号的波形有着严格的控制，其作为外辐射源信号有着其自身的特点^[5]。然而，LTE是最新的无线通信技术之一，对其的研究大多集中在通信领域，将其作为无源雷达外辐射源的研究目前在国内外尚处于初步探索状态。文献^[6]首先论证了LTE信号作为无源雷达外辐射源的可行性；文献^[7]分析和推导了LTE信号的距离分辨率为7.5 m，速度分辨率为0.11 m/s；文献^[8]对LTE信号模糊函数的性能进行初步的分析，说明了副峰产生的位置，但是没有详细的解释副峰产生的机理，没有对副峰提出相应的抑制方法；文献^[9]对基于LTE信号的外辐射雷达探测地面运动目标的能力进行了测试，检测出0~160 m范围内汽车、摩托车及人体的运动轨迹，由于其只对0~160 m近距离范围内的目标进行检测，所以可以不用考虑模糊函数的副峰的影响，因此文献^[9]并没有对模糊函数的副峰进行抑制，但是若要探测远距离目标时，LTE信号模糊函数副峰的影响就不可忽略了，否则近距离目标产生的副峰会产生虚警和遮掩弱目标，影响探测性能。

针对LTE信号模糊函数副峰产生的原因及抑制措施，本文根据LTE信号的帧结构，对其模糊函数的特性进行了分析，解释了LTE信号模糊函数特定副峰的产生机理，并针对不同的副峰提出了相应的抑制方法，最终得到图钉状的模糊函数。

2 LTE信号结构

LTE下行链路物理层传输信号的形成过程如下^[3]：首先对上层用户的数据进行循环冗余检查(CRC)码添加、子传输快分割、信道Turbo编码、码率匹配、码字重组；然后对每个码字的位进行绕码操作，进行星座调制映射以形成调制过的符号流；接着使用时域-频域资源网格，把资源元素映射到每一层的调制符号上；最后应用逆傅里叶变换生成一系列的OFDM符号，对每个OFDM符号添加循环前缀(CP)形成物理层信号帧，再经过基带到射频变换后传输到天线发射。

一个LTE物理层信号帧的长度为10 ms，每个信号帧又可分为10个1.0 ms子帧，每个子帧可分为2个0.5 ms时隙，每个时隙包含7个或6个CP，其取决于是使用普通CP还是扩展CP，普通CP的长度为4.68 μs，其可以适用于大多数城乡通信环境，为不失一般性，本文讨论的CP均为普通CP。LTE信号帧结构如图1所示。

LTE信号工作在2.5~2.6 GHz频段，信道带宽为1.4~20.0 MHz，其对应的资源块数目为6~100个资源块，每个资源块的总带宽为180 kHz，

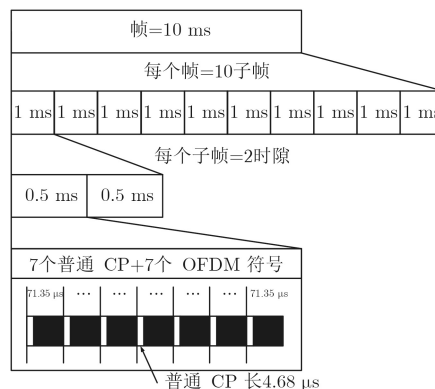


图1 LTE信号帧结构

由12个子载波互相关联组成，每个子载波的间隔为15 kHz。为了避免非比例高串扰出现的概率，在LTE下行链路传输中不使用DC子载波。

LTE信号的每个子帧都由时—频资源网格描述。1个资源网格包括3个组成部分：用户数据、控制信道和参考、同步信号。用户数据搭载了每个用户想要通信的信息；控制信道携带了接受端需要的用以正确解码信号所需的信息，其位于每个子帧的前3个OFDM符号；参考信号用于信道估计，在资源网格中以“菱形”结构分布，其具体位置如图2所示；同步信号用于小区的同步，且用来确定每个小区唯一的物理ID，其位于LTE信号每帧中的第1个和第6个子帧，且占用以DC子载波为中心的6个资源块，其具体位置如图3所示。



图2 LTE信号资源网格结构

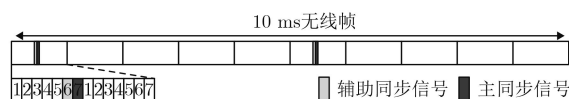


图3 同步信号位置示意图

3 LTE信号模糊函数分析

模糊函数的定义如式(1)：

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

其中 $s(t)$ 表示LTE信号的包络， τ 表示时延， f_d 表示

多普勒频率。模糊函数在分析雷达系统所用波形的距离和多普勒模糊及其分辨率、副瓣性能等方面有着重要的作用。外辐射源雷达由于所使用的信号为非合作性信号,并非雷达系统自身所设计,所以对其模糊函数的性能进行分析十分必要^[10]。

为不失一般性,仿真所用的LTE信号循环前缀类型为普通CP,信道带宽为20 MHz,选取10帧长度的LTE信号进行模糊函数运算,其模糊函数如图4所示,从图中可以看出,LTE信号的模糊函数存在1个主峰和一系列的副峰,下面将详细分析各个副峰的具体位置及其产生的原因,说明LTE信号的不同组成部分对于副峰贡献。

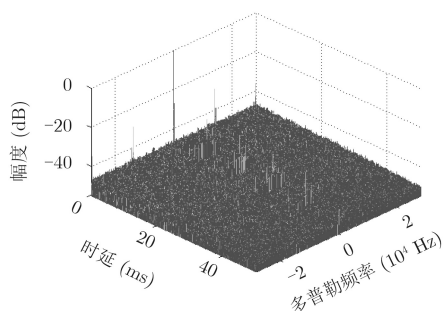


图4 LTE信号的模糊函数

LTE信号模糊函数的距离剖面如图5所示,其除了主峰外主要存在4种副峰。第1种副峰位于10 ms的整数倍处,这是由于LTE信号的每一帧中存在相同的参考信号和同步信号,根据距离模糊计算公式 $c \cdot T_b/2$,可知第1种副峰的模糊距离为1500 km。在实际探测中由于LTE信号基站的发射功率为30 W左右,天线增益为15 dB,设LTE信号的载频为2.6 GHz,带宽为20.0 MHz,雷达最小可检测信噪比为10 dB,针对空中飞机等目标,其横截面积一般为10 m²左右,根据雷达距离方程^[11],雷达的最大探测距离为20 km左右。第1种副峰的模糊距离在LTE信号基站的威力范围之外,其对雷达系统的探测性能毫无影响,所以可以不用考虑。第2种副

峰位于5ms的整数倍处,这是由于LTE信号每帧的第1个和第6个子帧中存在相同的小区同步信号,第2种副峰的模糊距离为750 km,同样也可以不用考虑。

第3种副峰位于66.67 μs处,其模糊距离为10 km左右,是由于LTE系统对每个OFDM符号添加CP所产生的。OFDM符号生成时对上层数据每个码字的位进行了绕码操作,保证了数据的随机化,所以各个OFDM符号之间没有相关性,不会产生副峰。但是为了抑制多径干扰,LTE信号对每个OFDM符号都添加了CP,每个OFDM符号的CP都为其各自末尾的一段数据,这两部分的数据进行相关就会产生副峰。LTE信号每个时隙的OFDM符号长度为71.35 μs,对应的CP长度为4.68 μs,所以每个OFDM符号的实际有效数据长度为66.67 μs,导致LTE信号每间隔66.67 μs的长度就会有一截数据重复,从而在66.67 μs的位置产生第3种副峰。

第4种副峰是位于主峰附近一系列类似于sinc函数的旁瓣副峰,但其旁瓣幅度不像sinc函数那样逐渐下降,而是在下降的过程中幅度仍有起伏且旁瓣位置并不相同,如图5中虚线框所示,其主要是由于LTE信号下行链路频谱不连续导致的。图6为LTE信号下行链路的频谱,信道带宽为20 MHz,其对应资源块数量为100,一个资源块的带宽为180 kHz,所以总的传输带宽为18 MHz(如图6(a)中虚线框所示),有2 MHz的保护带宽(如图6(a)中实线框所示)。LTE信号下行链路传输中为了避免非比例高串扰出现的概率,其不使用DC子载波,所以导致中心频率附近15 kHz的频谱也不连续(如图6(b)中实线框所示)。

下面对第4种副峰产生的机理进行详细的推导。LTE信号每个OFDM符号的时域表达式如式(2):

$$s(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(j2\pi f_k t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

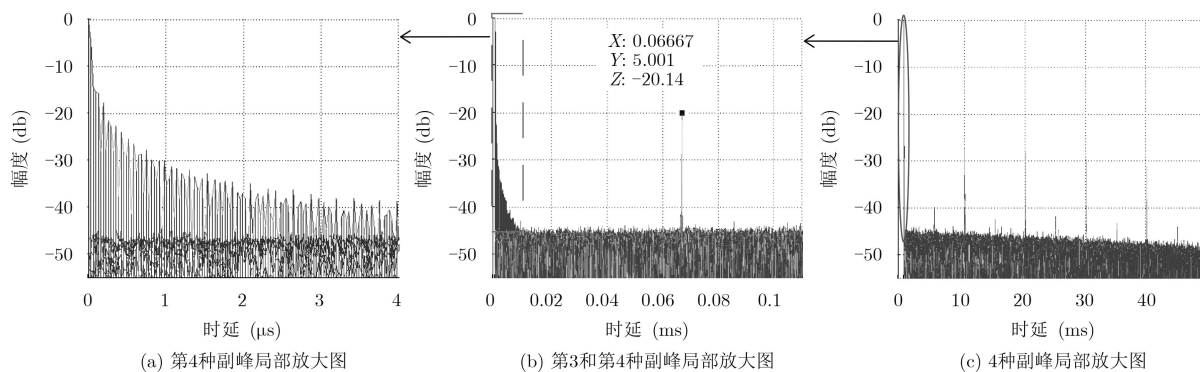


图5 LTE信号模糊函数距离剖面

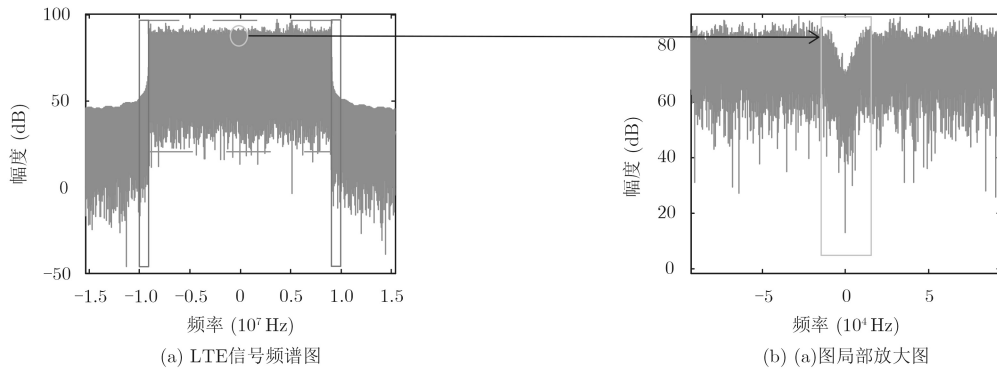


图6 LTE信号下行链路频谱

式中, T 为OFDM符号数据体时长, N 为LTE信号的子载波个数, c_k 为第 k 个子载波所分配的要调制的数据符号, $f_k = k\Delta f$ 为子载波频率。

对于模糊函数的定义式(1), 根据傅里叶变换的性质, 可以得到模糊函数的另一种表达式:

$$|\mathbf{A}(\tau, f_d)| = \frac{1}{E_c} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} S(f - f_d) S^*(f) e^{j2\pi f\tau} df \right| \quad (3)$$

式中, $E_c = \sum_k |c_k|^2$, $S(f)$ 为 $s(t)$ 的傅里叶变换, 式(1)为信号 $s(t)$ 的模糊函数表达式, 式(3)为其对应频谱 $S(f)$ 的模糊函数表达式。

对式(2)做傅里叶变换, 可得到OFDM符号的频谱:

$$S(f) = \sum_k c_k \left\{ e^{j\pi(f_k - f)T} \text{sinc}[\pi(f_k - f)T] \right\} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 可得OFDM符号的模糊函数与 c_k 的对应关系^[12]。

$$|\mathbf{A}(\tau, 0)| = \left| e^{j\pi m \frac{n_1+1}{N}} \frac{\sin(\pi m)}{\sin\left(\frac{\pi m}{N}\right)} - e^{j\pi m \frac{n_1+n_2}{N}} \frac{\sin\left(\frac{n_2 - n_1 - 1}{N} \pi m\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{N}\right)} \right| \quad (8)$$

式中, n_1 为不连续频谱的起始位置, n_2 为不连续频谱的结束位置。

对于LTE信号下行链路来说, 其有3段不连续的频谱, 所以会在主峰附近形成一系列类似于sinc函数的逐渐下降的副峰。

4 LTE信号模糊函数副峰抑制

外辐射源雷达通过对参考通道的直达波和主通道的目标回波信号进行互模糊运算来获取目标的距离和速度信息, LTE信号模糊函数的副峰会产生虚警和掩盖弱目标的主峰, 影响探测性能, 所以需要在进行互模糊运算之前对LTE信号进行预处理, 抑制副峰的产生。根据上一节对LTE信号模糊函数副峰特性及产生原因的分析, 需要抑制的副峰主要有

$$|\mathbf{A}(\tau, f_d)| = \frac{1}{E_c} \left| \sum_{k_1} \sum_{k_2} c_{k_1} c_{k_2}^* e^{j\frac{2\pi}{N} k_2 m} \alpha(k_1 - k_2 + k_d) \right| \quad (5)$$

式中,

$$\alpha(k_1 - k_2 + k_d) = e^{j\pi(k_1 - k_2 + k_d)} \text{sinc}(\pi(k_1 - k_2 + k_d)) \quad (6)$$

其中, $m = B\tau = N\Delta f\tau$, $k_d = f_d/\Delta f = f_d T$ 为归一化时延及多普勒频率。

针对模糊函数的距离剖面, 即 $\tau \neq 0, f_d = 0$, 此时式(5)变为

$$|\mathbf{A}(\tau, 0)| = \frac{1}{E_c} \left| \sum_k |c_k|^2 e^{j\frac{2\pi}{N} km} \right| \quad (7)$$

当LTE信号频谱不连续时, 即LTE信号的若干个子载波是不可用的, 那么其对应的 c_k 为0。当有一段频谱不连续时, 即有连续个 c_k 为0时, 此时式(7)变为

循环前缀产生的副峰及频谱不连续产生的副峰, 下面针对这两种副峰的抑制方法, 分别进行讨论。

4.1 循环前缀副峰抑制

循环前缀副峰产生的原因是由于OFDM符号和其自身的循环前缀有着较强的相关性, 要想抑制循环前缀副峰必须破坏两者之间的相关性, 为了达到这一目的, 国内外文献大都采用对循环前缀置零的方法来实现^[13,14], 但是直接对循环前缀置零, 相当于对信号在时域加了一系列的矩形窗, 使得信号呈现脉冲串的特点, 从而在互模糊运算后在多普勒轴上又引起新的副峰^[15]。为了解决这一问题, 文献^[16]提出了一种组合模糊函数的方法, 可以消除新产生的多普勒副峰, 但是这种方法需要进行两次互

模糊运算，增加了1倍的运算量，无疑给实时探测目标增加了困难。本文在数据分块快速互模糊算法^[17,18]的基础上进行改进，提出了数据非连续分块快速互模糊算法，在数据非连续分块的过程中移除循环前缀数据，通过这种方法只需进行一次互模糊运算就可以抑制循环前缀副峰，且不会引起新的多普勒副峰，同时分块算法还提高了互模糊函数的计算速度。

数据分块快速互模糊算法首先对采样数据进行分块，对参考通道和回波通道对应块之间做互相关，然后进行FFT运算^[19]。为了抑制循环前缀副峰，对其进行改进，在分块的时候移除循环前缀，对数据进行非连续分块。由于探测目标具有不可预知性，不能确定主通道回波信号中循环前缀数据的位置，无法对其进行移除，所以对于参考通道的直达波信号，不仅要移除循环前缀数据，还要移除其对应的OFDM符号尾部与其相同的数据，来消除与回波信号中循环前缀数据的相关性。

如图7所示，图7(a)为非连续分段后的参考信号，虚线框中的数据为要移除的数据，图7(b)为回波信号分段的过程。参考信号进行分块时，将每个移除循环前缀数据及其对应的OFDM符号尾部数据的剩余OFDM符号有效数据体分成一块，其在参考信号中的位置可表示为式(9)，式中， u 表示原始参考数据， M 表示分块后的数据块总数， m 表示是第几个数据块， L_{CP} 表示循环前缀长度， N_{eff} 表示剩余OFDM符号有效数据体长度。对于回波信号将一个与参考信号数据块等长的矩形窗沿着时间

维依次进行滑动，将矩形窗内对应的数据作为不同距离单元的匹配滤波器，其具体表达形式如式(9)所示， v 表示原始回波数据， N 为所关心的距离单元总数， n 为距离单元位置。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_m &= u[(2m-1)L_{CP} + (m-1)N_{eff} + 1 + \dots \\ &\quad + (2m-1)L_{CP} + mN_{eff}], \quad m = 1, 2, \dots, M \\ \mathbf{v}_{mn} &= v[(2m-1)L_{CP} + (m-1)N_{eff} + n + \dots \\ &\quad + (2m-1)L_{CP} + mN_{eff} + n - 1], \\ &\quad n = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

参考信号和回波信号逐个数据块进行互相关后，得到图7(c)所示的2维相关矩阵：

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(m, n) &= \mathbf{u}_m \otimes \mathbf{v}_{mn} \\ &= \sum_{n=1}^N \{ u[(2m-1)L_{CP} + (m-1)N_{eff} \\ &\quad + 1 + \dots + (2m-1)L_{CP} + mN_{eff}] \\ &\quad \cdot v^* [(2m-1)L_{CP} + (m-1)N_{eff} \\ &\quad + n + \dots + (2m-1)L_{CP} + mN_{eff} + n - 1] \} \end{aligned} \quad (10)$$

对2维相关矩阵的列向量进行FFT变换，便可获得目标的多普勒信息，得到参考信号和回波信号的互模糊函数，即：

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(n, \omega_D) &= \sum_{m=0}^{M-1} e^{-j\omega_D m} \mathbf{Y}(m, n) \\ &= \text{FFT} [\mathbf{Y}(1, 2, \dots, M, n)] \end{aligned} \quad (11)$$

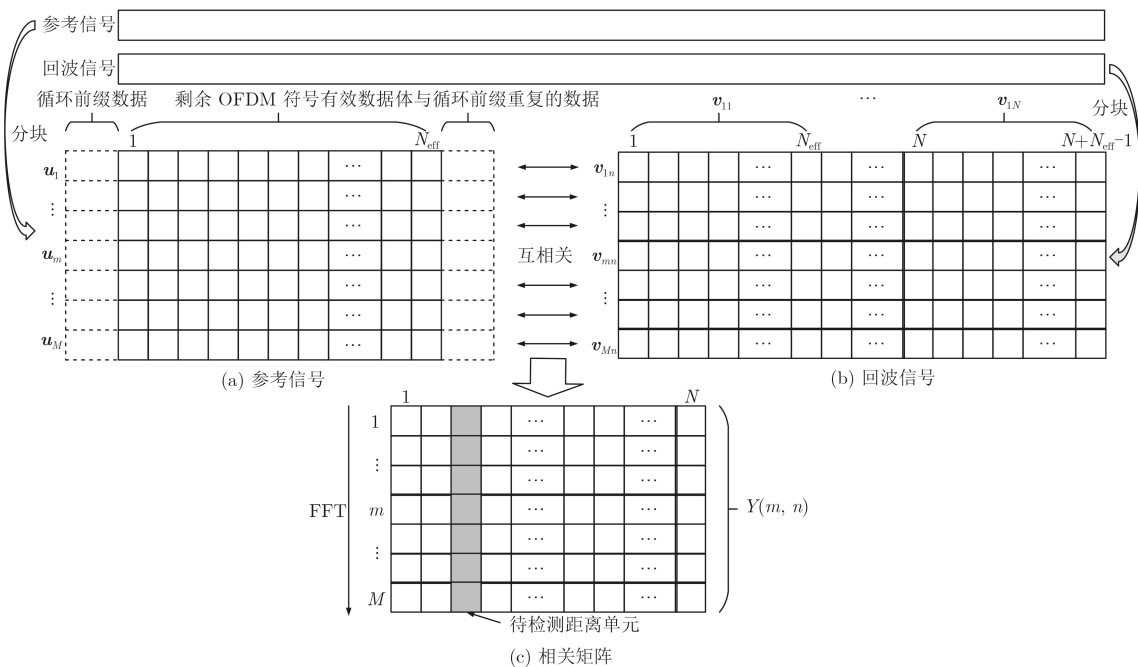


图7 数据非连续分块快速互模糊算法示意图

多普勒维的等效采样率为 $\tilde{f}_r = M/T_s$, T_s 为相干累积时间长度, 变换后的多普勒频率范围为 $[-\tilde{f}_r/2, \tilde{f}_r/2] = [-M/(2T_s), M/(2T_s)]$ 。多普勒频率分辨率为 $\Delta_f = \tilde{f}_r/M = 1/T_s$, 这与传统互模糊函数计算方法的结论一致, 只与 T_s 有关。

LTE信号经过数据非连续分块快速互模糊算法处理的结果如图8所示, 从图中可以看出66.67 μs 处的循环前缀副峰得到了有效的抑制, 且没有引起新的副峰。本文选取的多普勒积分数据为10帧长度的LTE数据, 相干积累时间为100 ms, 根据第2节所述, 包含1400个OFDM符号, 被分为1400个数据块, 可观测的多普勒频率范围为 $-7\sim 7$ kHz, 因此对探测目标的速度范围有一定的限制。

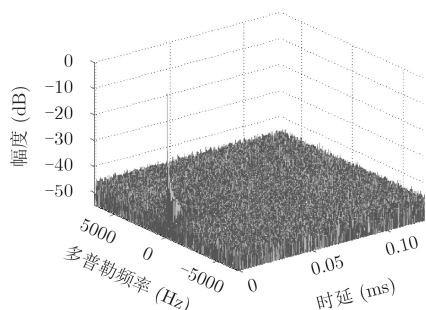


图8 LTE信号非连续分块模糊函数图

目标径向速度 ν 与多普勒频率 f_d 的关系式为

$$\nu = \frac{f_d \cdot \lambda}{2\cos(\alpha)\cos(\beta/2)} \quad (12)$$

式中 α 和 β 分别是相对速度角和双基地角, λ 为信号波长, LTE信号的载波频率为2.5 GHz, 对应的波长为 $\lambda = c/f_0 = 0.12$ m。所以对应的最大速度探测范围为 $-420\sim 420$ m/s, 能够满足对飞机、汽车、船舶等诸多移动目标的探测要求。

4.2 频谱不连续产生的副峰抑制

由上节的分析可知, LTE信号不连续的频谱导致模糊函数在主峰附近存在一系列类似于sinc函数的逐渐下降的副峰, 本节通过频谱合成的方法将LTE信号不连续的频谱合成为一个连续的频谱, 并对合成后的频谱加窗, 实现对副峰的抑制。

通过上节的分析可以知道LTE信号不连续的频谱位置(即DC子载波和保护带宽对应的频谱位置), 由此可以确定每个连续频谱信号的频带范围为 $\omega_{l_n} \sim \omega_{u_n}$, 然后根据此频带范围设计频域滤波器 $H_n(\omega)$ 提取连续的频谱信息 $G_n(\omega)$, n 为每个连续频谱信号的序号, 此过程如式(13)所示。

$$G_n(\omega) = S(\omega - \omega_{B_n})H_n(\omega - \omega_{B_n}) \quad (13)$$

式中, $S(\omega)$ 为LTE信号变换到频域的频谱, ω_{B_n} 为

第 n 个连续频谱的带宽, $H_n(\omega)$ 的取值为

$$H_n(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_{l_n} \leq \omega \leq \omega_{u_n} \\ 0, & \omega < \omega_{l_n}, \omega > \omega_{u_n} \end{cases} \quad (14)$$

LTE信号经过频域滤波器提取后的有效频谱信息 $G_n(\omega)$ 有两部分, $G_1(\omega)$ 为左半频带的8.9925 MHz的频谱信息, $G_2(\omega)$ 为右半频带的8.9925 MHz的频谱信息, 将 $G_1(\omega)$ 向右搬移7.5 kHz, $G_2(\omega)$ 向左搬移7.5 kHz, 得到一个完整的连续频谱信号 $G(\omega)$:

$$G(\omega) = \sum_n G_n(\omega) \quad (15)$$

频带合成后的 $G(\omega)$, 形成一个类矩形谱, 模糊函数距离维在主峰附近仍然呈现sinc函数特性, 为了进一步抑制主峰附近的距离副峰, 对合成后的频谱 $G(\omega)$ 加一个kaiser窗 $W(\omega)$, 衰减系数 β 的值设为通常使用的2.5, 此时边缘处的窗权重是峰值处的1/3, 加窗过程如式(16)所示。

$$G'(\omega) = G(\omega)W(\omega) \quad (16)$$

LTE信号经过频带合成和加窗处理后的频谱 $G'(\omega)$ 如图9所示, 将 $G'(\omega)$ 变换到时域, 进行互模糊运算后的结果如图10所示, 从图中可以看出主峰附近一系列类似于sinc函数的逐渐下降的副峰得到了有效的抑制, 使得主峰呈现出图钉形状。频带合成的方法会降低信号的带宽, 造成主瓣展宽、测距和测角精度降低等问题, 但是由于移除的频带占总带宽的比例较小, 所以这些影响可以忽略。

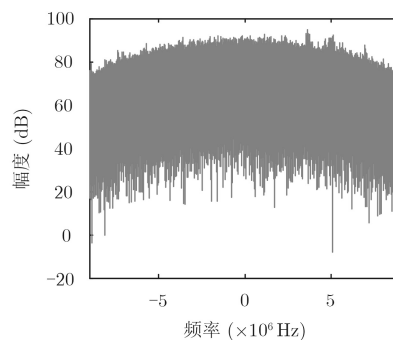


图9 LTE信号频带合成和加窗处理后的频谱图

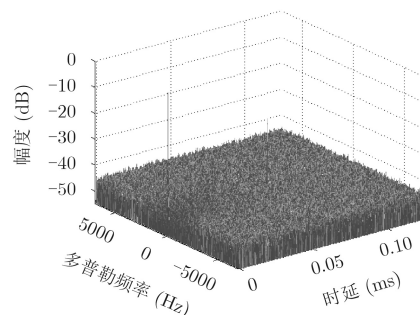


图10 LTE信号频带合成和加窗处理后模糊函数图

4.3 副峰抑制综合处理流程

综上所述,可以得到LTE信号外辐射源雷达模糊函数副峰抑制的综合处理流程,如图11所示。首先对参考通道的信号进行直达波提纯,抑制多径干扰,然后利用提纯后的参考信号对回波信号进行杂波对消,关于直达波提纯和杂波对消算法国内外有大量的文献对其进行了讨论,不作为本文的研究重点,在此不做过多的论述。接下来对参考信号和回波信号进行频带合成和频域加窗抑制频谱不连续产生的副峰,然后通过数据非连续分块快速互模糊算法抑制循环前缀副峰,对于参考信号进行非连续分块,将每个移除循环前缀数据及其对应的OFDM符号尾部数据的剩余有效数据分成一块,对于回波信号用一个与参考信号数据块等长的矩形窗滑动截取数据,作为不同距离单元的匹配滤波器;经过互相关和多普勒谱分析后,最终得到LTE信号图钉状的互模糊函数,如图12所示。

5 结论

本文首先介绍了LTE信号的结构特点,然后对

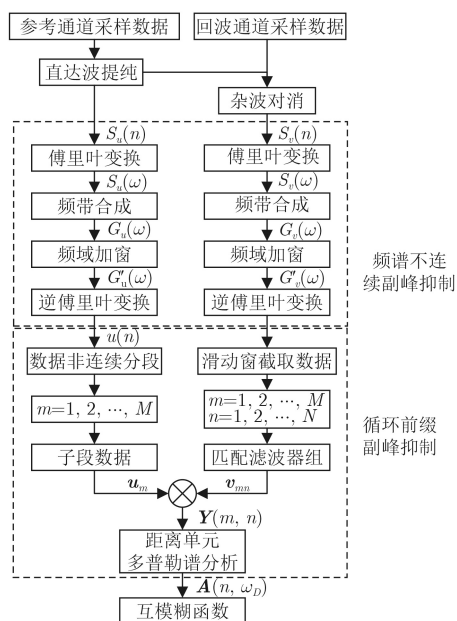


图 11 综合处理流程图

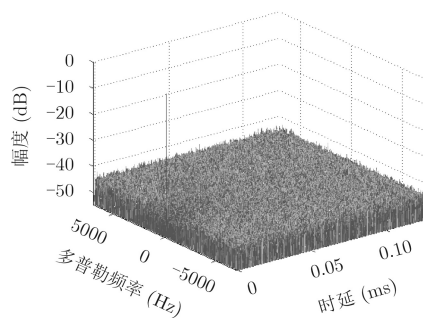


图 12 LTE信号综合处理后模糊函数图

其模糊函数的特性进行了分析,分析表明LTE信号模糊函数除了主峰外还存在4种副峰,其中由于LTE信号结构中参考信号和同步信号产生的2种副峰的距离位置在LTE信号基地的威力范围之外,可以不用考虑;由循环前缀产生的10 km处的副峰和由于LTE信号频谱不连续产生的主峰附近一系列类似于sinc函数的逐渐下降的副峰需要进行抑制。针对循环前缀副峰,提出了数据非连续分块快速互模糊算法;针对频谱不连续产生的副峰,提出了频带合成和频域加窗的抑制算法。最终通过2种抑制算法的综合处理,得到了LTE信号图钉状的模糊函数。论文工作为基于LTE信号的外辐射源雷达副峰抑制提供了新的方法。

参考文献

- [1] GRIFFITHS H and BAKER C. Passive coherent location radar systems. Part 1: Performance prediction[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 153–159. doi: 10.1049/ip-rsn:20045082.
- [2] OLSEN K E and ASEN W. Bridging the gap between civilian and military passive radar[J]. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*, 2017, 32(2): 4–12. doi: 10.1109/MAES.2017.160030.
- [3] 3GPP TS 36.211 V13.2.0, Physical channels and modulation[S]. (July 2016).
- [4] CUI Haixia, LEUNG V C M, LI Shaoqian, et al. LTE in the unlicensed band: Overview, challenges, and opportunities[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4): 99–105. doi: 10.1109/MWC.2016.1600031WC.
- [5] LABIB M, MAROJEVIC V, REED J H, et al. Enhancing the robustness of LTE systems: Analysis and evolution of the cell selection process[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(2): 208–215. doi: 10.1109/MCOM.2017.1500706CM.
- [6] EVERS A and JACKSON J A. Analysis of an LTE waveform for radar applications[C]. *IEEE Radar Conference*, Cincinnati, USA, 2014: 200–205. doi: 10.1109/RADAR.2014.6875584.
- [7] 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]. *IEEE International RF and Microwave Conference*, Penang, Malaysia, 2016: 258–262. doi: 10.1109/RFM.2013.6757261.
- [8] 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.

- [9] ABDULLAH R S A R, SALAH A A, ISMAIL A, *et al.* Ground moving target detection using LTE-based passive radar[C]. International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics and Telecommunications, Bandung, Indonesia, 2016: 70–75. doi: [10.1109/ICRAMET.2015.7380777](https://doi.org/10.1109/ICRAMET.2015.7380777).
- [10] EVERS A and JACKSON J A. Cross-ambiguity characterization of communication waveform features for passive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2015, 51(4): 3440–3455. doi: [10.1109/TAES.2015.140622](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140622).
- [11] RICHARD M A著. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 262–279.
- [12] 沈小东. 断续谱OFDM雷达信号特性的仿真研究[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(5): 60–64. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.05.013](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.05.013).
SHEN Xiaodong. Research into the simulation of signal characteristics of OFDM radar with discontinuous spectrum[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2017, 40(5): 60–64. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.05.013](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2017.05.013).
- [13] 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 Yunhua, ZHU Fengyuan, ZHANG Xiuzhi, *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).
- [14] LI Jichuan, LYU Xiaode, and ZHAO Yaodong. A novel algorithm for side peaks suppression of ambiguity function for passive radar based on Chinese DTTB signal[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2012, 29(6): 485–492. doi: [10.1007/s11767-012-0912-x](https://doi.org/10.1007/s11767-012-0912-x).
- [15] 高志文, 陶然, 单涛. DVB-T辐射源雷达信号模糊函数的副峰分析与抑制[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 505–509. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.03.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.03.018).
GAO Zhiwen, TAO Ran, and SHAN Tao. Side peaks analysis and suppression of DVB-T signal ambiguity function for passive radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(3): 505–509. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.03.018](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.03.018).
- [16] 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: [10.3724/SP.J.1146.2011.00132](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00132).
WAN Xianrong, CEN Bo, CHENG Feng, *et al.* Ambiguity function of CMMB signal analysis and processing based passive radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2489–2493. doi: [10.3724/SP.J.1146.2011.00132](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00132).
- [17] YANG Jinlu, SHAN Tao, and TAO Ran. Fast computation of cross ambiguity function for DTTB based passive radar[C]. 2010 2nd International Conference on Signal Processing System. Dalian, China, 2010, Vol.1: 661–664. doi: [10.1109/ICSPS.2010.5555650](https://doi.org/10.1109/ICSPS.2010.5555650).
- [18] 赵耀东, 吕晓德, 李纪传, 等. 无源雷达多普勒谱分析实现活动目标检测的方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 247–256. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20081](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20081).
ZHAO Yaodong, LÜ Xiaode, LI Jichuan, *et al.* Detection of moving targets based on doppler spectrum analysis technique for passive coherent radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 247–256. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.20081](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.20081).
- [19] 蒋柏峰, 吕晓德, 赵耀东, 等. 一种基于DTTB信号的无源相干雷达模糊函数快速算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(3): 589–594. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00900](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00900).
JIANG Baifeng, LÜ Xiaode, ZHAO Yaodong, *et al.* A fast algorithm of ambiguity function for passive coherent radar based on DTTB signal[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(3): 589–594. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.00900](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00900).
- 吕晓德: 男, 1969年生, 研究员, 研究方向为基于阵列技术的新体制雷达系统及其应用.
- 张汉良: 男, 1993年生, 硕士生, 研究方向为基于LTE信号的无源雷达信号处理.
- 杨璟茂: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为机载外辐射源雷达杂波抑制.
- 岳琦: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为外辐射源雷达信号处理.