

基于 CMMB 的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理

万显荣* 岑博 程丰 饶云华 龚子平
(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘要: 根据中国移动多媒体广播(CMMB)信号结构, 该文分析了该信号作为雷达辐射源的模糊函数特性, 研究了副峰产生的机理, 并与欧洲数字视频地面广播(DVB-T)信号特性做了比对; 针对因循环前缀引起的模糊函数副峰和同步信号引起的多普勒模糊带对目标探测产生的不利影响, 提出了副峰抑制的方法。仿真和实测结果验证了文中副峰产生机理分析的正确性, 同时所采用的方法能有效抑制模糊副峰, 为目标探测奠定了基础。

关键词: 中国移动多媒体广播(CMMB); OFDM; 外辐射源雷达; 模糊函数

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2489-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00132

Ambiguity Function Analysis and Processing of CMMB Signal Based Passive Radar

Wan Xian-rong Cen Bo Cheng Feng Rao Yun-hua Gong Zi-ping
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: According to the signal structure of China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB), this paper analyzes the ambiguity function of CMMB signal as illuminator of opportunity for passive radar systems. The mechanism of these ambiguity peaks is researched and compared with Europe Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T) signal. As for the adverse effects because of the side peaks caused by cyclic prefix and Doppler ambiguity strips due to sync-signal, a method for suppressing these ambiguities is proposed. Simulation and experimental results show that the analysis of side peaks' mechanism is correct and the method can suppress side peaks effectively, which lays the foundation for target detection.

Key words: China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB); OFDM; Passive radar; Ambiguity function

1 引言

外辐射源雷达是一种利用第三方发射的电磁信号探测跟踪目标的双/多基地雷达系统。随着数字广播电视在全球日益普及并逐步取代模拟信号, 近年来利用数字音频广播、数字视频广播等信号的无源探测引起了国内外学者的广泛兴趣^[1-5], 以上信号都采用了一种新型高效的多载波数字调制技术, 即正交频分复用(OFDM)技术。

欧洲目前已基本实现全频段数字广播电视信号覆盖, 走在世界的前列, 其中包括 HF 波段的数字调幅广播(DRM, ETSI ES 201 980), VHF 波段的数字音频广播(DAB, ETSI 300 401)和 UHF 波段的数字视频广播(DVB-T, ETSI EN 300744), 其中 DVB-T 信号以其高带宽、信号覆盖广等优点, 从众多信号中脱颖而出, 成为新体制外辐射源雷达研究

的热点^[4-8]。

我国数字广播电视发展相对滞后, 近年也在积极跟踪与研究相关技术。为维护国家信息安全和民族利益, 我国相继研究出了具有自主知识产权的符合国情的数字广播电视标准, 同时也制定了相应的实施计划。目前国家广播电视总局推出的数字移动多媒体视频广播(CMMB, GY/T 220.1-2006)已进入商用阶段。CMMB 系统是立足我国国情, 通过吸纳成熟先进技术而设计的“天地一体化”的技术体系, 拥有低成本、可快速实现移动多媒体广播信号全国覆盖的优点。经过几年的发展, 截止到 2010 年底, CMMB 信号已实现全国 320 个主要城市地面覆盖, 这为研究 CMMB 外辐射源雷达提供了极好的条件。据作者调研所及, 目前国内对 CMMB 的研究仅限于通信领域, 还未见将其作为雷达辐射源的研究报道。

本文首先介绍了 CMMB 信号的结构, 然后通过理论分析与计算机仿真研究了 CMMB 信号作为雷达辐射源的模糊函数特点, 并与 DVB-T 信号的

2011-02-21 收到, 2011-06-07 改回

国家自然科学基金(60971101, 41074116)和湖北省杰出青年基金(2009CDA016)资助课题

*通信作者: 万显荣 xrw@126.com

模糊函数做了比较, 推导模糊副峰产生的位置和原因, 接着提出了副峰抑制的方法。

2 CMMB 信号结构

CMMB 物理层逻辑信道信号是由来自上层的输入数据流经过前向纠错编码、交织和星座映射后, 与离散导频和连续导频复接在一起进行 OFDM 调制。调制后的信号加入保护间隔, 循环前缀, 然后插入帧头形成物理层信号帧, 再经过基带至射频变换后发射^[9]。

CMMB 物理层信号 1 帧持续时间为 1 s, 划分为 40 个时隙, 每个时隙包含 1 个信标和 53 个 OFDM 数据符号, 信标又进一步分为发射机标识信号 (TxID) 和两个同步信号。信号帧结构如图 1 所示。

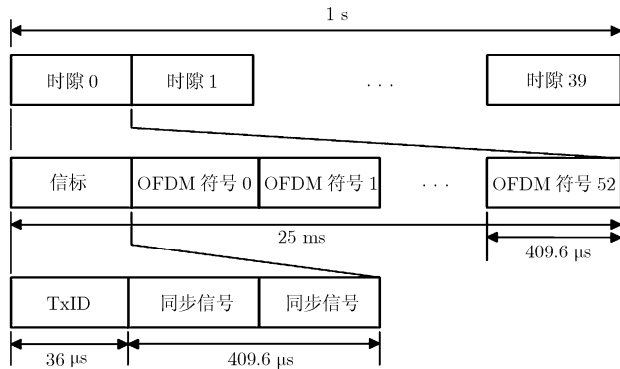


图 1 CMMB 信号帧结构

CMMB 信号具有 8 MHz 带宽和 2 MHz 带宽 2 种工作模式, 不同带宽的信号子载波数不一样。CMMB 信号一个符号可表示为

$$s(t) = \exp(j2\pi f_c t) \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp[j2\pi k \Delta f (t - T_{CP} - T_{GI})], \quad 0 \leq t \leq T_u + T_{CP} + T_{GI} \quad (1)$$

其中 k 是子载波序号, N 是每个 OFDM 符号包含的子载波数, Δf 为子载波间隔, c_k 是复调制数据, f_c 为射频信号的中心频率, T_u 是 OFDM 符号有效部

分持续时间, T_{CP} 为循环前缀的持续时间, $T_{GI} = 2.4 \mu s$ 是保护间隔长度。本文以 8 MHz 带宽模式为例, 信号各参数如表 1 所示, 图 2 为实测信号频谱。

由表 1 可见, CMMB 信号不同于 DVB-T 信号^[10], 它含有 3 种时长的信号, 即发射机标识信号、同步信号、OFDM 符号, 并且它们的子载波间隔各不相同, 这使得 CMMB 信号有自己独特的模糊函数。

表 1 CMMB 信号 8MHz 带宽模式参数

信号	T_{CP} (μs)	T_u (μs)	有效子载波个数	子载波间隔 (kHz)
TxID	10.4	25.6	256	39.0625
同步信号	0	204.8	2048	4.8828
OFDM 符号	51.2	409.6	3076	2.4414

3 模糊函数分析

模糊函数定义式为

$$|A(t, f_d)| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \exp(j2\pi f_d \tau) s^*(\tau - t) d\tau \right| \quad (2)$$

其中 $s(\tau)$ 为 CMMB 信号包络, t 是时延, f_d 为多普勒频移。不失一般性, 同时考虑到计算的方便, 本文选取 CMMB 信号 1 个时隙的信标部分和前 30 个 OFDM 符号来处理, 对应积分时间为 14.3 ms。考虑到实际情况和副峰的位置, 设定 $0 \leq t \leq 1.02 \text{ ms}$, $|f_d| \leq 3 \text{ kHz}$, 图 3 为 CMMB 实测信号模糊函数。由图可见, CMMB 信号的模糊函数由一个主峰和多普勒轴上的一条带状模糊副峰 (本文将它定义为多普勒模糊带) 以及循环前缀副峰组成。CMMB 信号在 OFDM 调制前, 由于频域符号进行了加扰处理, 破坏了导频符号的周期性重复规律, 这与 DVB-T 信号具有明显的区别。图 4 给出了 DVB-T 仿真信号模糊函数图, 这与文献[5]的结果一致, 比较图 3 和图 4 可以看到, CMMB 信号不会产生类似 DVB-T 信号模糊函数中的导频副峰, 由于导频副峰的符号

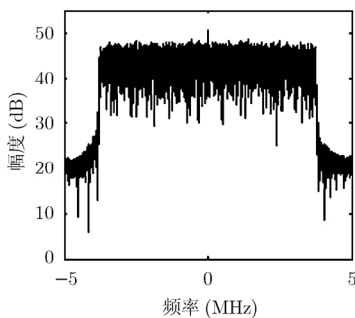


图 2 CMMB 8 MHz 带宽模式频谱图

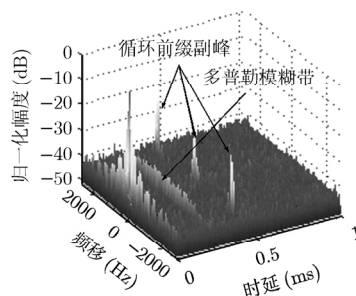


图 3 CMMB 信号模糊函数图

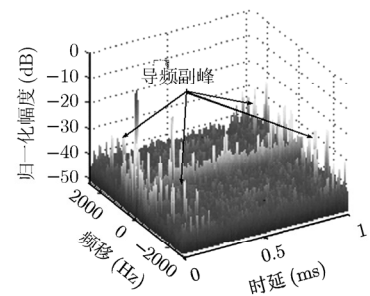


图 4 DVB-T 信号模糊函数图

内和符号间副峰需分开处理，这意味着 CMMB 模糊副峰抑制较 DVB-T 方便，更有利于进行无源探测。

针对 CMMB 信号中以上两种类型的模糊因素，本节将具体分析形成副峰的原因并给出去除模糊副峰的方法。

3.1 循环前缀引起的副峰

原始的 CMMB 节目数据流经过信源编码、信道编码、字节和比特交织以及加扰的作用，确保了数据的随机性，因此，OFDM 符号有效部分间的相关不会产生副峰。但是，由于循环前缀与 OFDM 符号有效部分后面一段数据相同，因此这两部分相关会引起副峰。消除循环前缀副峰必须移除这两部分间的相关性，这可以通过将循环前缀置零来实现，此时信号呈现出脉冲串波形的特点。令此时信号为 $u(t)$ ，并假设

$$x_i(t) = \begin{cases} u(t + iT_s), & 0 \leq t \leq T_u \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

其中 T_s 为 OFDM 符号的总持续时间 ($T_s = 463.2 \mu\text{s}$)，令 M 为 OFDM 符号的个数，则 $u(t)$ 可表示为

$$u(t) = \sum_{m=0}^{M-1} x_m(t - mT_s) \quad (4)$$

计算 $u(t)$ 的模糊函数得^[11]

$$\begin{aligned} A(t, f_d) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_{m=0}^{M-1} x_m(\tau - mT_s) \right) \\ &\quad \cdot \left(\sum_{n=0}^{M-1} x_n^*(\tau - t - nT_s) \right) e^{j2\pi f_d \tau} d\tau \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-\infty}^{+\infty} x_m(\tau - mT_s) x_n^* \\ &\quad \cdot (\tau - t - nT_s) e^{j2\pi f_d \tau} d\tau \end{aligned} \quad (5)$$

令 $\tau' = \tau - mT$ ，则有

$$\begin{aligned} A(t, f_d) &= \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi f_d mT_s} \sum_{n=0}^{M-1} \int_{-\infty}^{+\infty} x_m(\tau') x_n \\ &\quad \cdot (\tau' - t - nT_s + mT_s) e^{j2\pi f_d \tau'} d\tau' \end{aligned} \quad (6)$$

记

$$\begin{aligned} &A_{mn}[t - (m - n)T_s, f_d] \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x_m(\tau') x_n(\tau' - t - nT_s + mT_s) e^{j2\pi f_d \tau'} d\tau' \end{aligned} \quad (7)$$

由于 OFDM 符号的数据彼此之间具有随机性，因此当 $t = 0$ 时，

$$A_{mn}[-(m - n)T_s, f_d] \ll A_{mm}(0, f_d) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} A_{00}(0, f_d) &\approx A_{11}(0, f_d) \approx \dots \approx A_{(M-1)(M-1)}(0, f_d) \\ &= A_x(0, f_d) \end{aligned} \quad (9)$$

则对式(6)在 $t = 0$ 处取模并近似为

$$\begin{aligned} |A(0, f_d)| &= A_x(0, f_d) \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi f_d mT_s} \\ &= \left| \frac{\sin(\pi f_d M T_s)}{\sin(\pi f_d T_s)} \right| |A_x(0, f_d)| \end{aligned} \quad (10)$$

在式(10)中， $\left| \frac{\sin(\pi f_d M T_s)}{\sin(\pi f_d T_s)} \right|$ 在 n/T_s 处取得峰值，

$|A_x(0, f_d)|$ 在 $|f_d| \gg 0$ 时趋于稳定值，因此，循环前缀置零引起模糊函数产生新的副峰，且副峰位于 $(0, n/T_s)$ ， $n \in Z$ 。

3.2 信标引起的多普勒模糊带

CMMB 信标部分由 1 个发射机标识信号和 2 个完全相同的同步信号构成。发射机标识信号的循环前缀会引起副峰，但考虑到其循环前缀长度 T'_{CP} 较短 ($10.4 \mu\text{s}$)，相关产生的峰值相对模糊函数主峰较小，副峰表现得不明显，并且副峰产生的原理与同步信号类似，因此，这里仅对同步信号的模糊特性进行分析。

CMMB 符号可简化表示为

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t \leq T_u \quad (11)$$

计算其频谱得

$$\begin{aligned} F(\omega, k, \Delta f) &= \sum_{k=0}^{N-1} c_k T_u e^{-j(\omega - 2\pi k \Delta f) T_u / 2} \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left[\frac{(\omega - 2\pi k \Delta f) T_u}{2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

其中 sinc 函数定义为 $\text{sinc}(x) = \sin x/x$ ， K 为子载波数， c_k 是第 k 个子载波的复调制数据， Δf 为子载波间隔， T_u 为数据有效部分时长。式(12)表明，信号频谱是由 K 个 Sa 函数叠加在一起构成的，Sa 函数峰值出现在 $\omega = 2\pi k \Delta f$ 处，因此，频谱结构与子载波数和子载波间隔有密切的关系，图 5 画出了同步信号子载波频谱叠加原理图，中心频率间隔 Δf 的多个 Sa 函数叠加构成了最终的信号频谱。从表 1 中可以看到，同步信号子载波间隔是 OFDM 数据符号子载波间隔的 2 倍，这导致两部分信号的频谱结构有差异。由于自相关函数与功率谱函数构成傅里叶变换对，使得这两部分信号的自相关函数表现出各自的特点，并在模糊函数上体现出来。

同步信号时长 $T_u = 204.8 \mu\text{s}$ ，则其多普勒分辨率 $\Delta f = 4.88 \text{ kHz} \gg 1/T = 70 \text{ Hz}$ ，其中 T 为积分时间，本文选取 14.3 ms 。信标中的 2 段完全相同的同步信号，延迟 $204.8 \mu\text{s}$ 相关时会产生副峰，较低的多普勒分辨率使得副峰在多普勒轴上展宽，形成如图 3 中所示的多普勒模糊带。在 DVB-T 信号中，

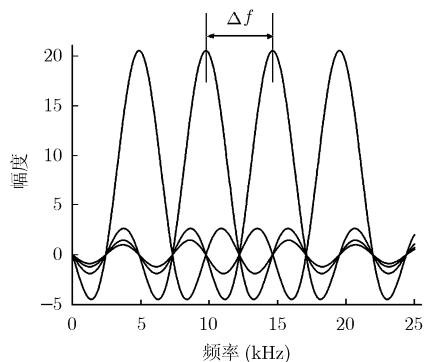


图5 子载波频谱叠加原理图

所有子载波间隔均相等,这使得不同 OFDM 符号的频谱结构相同,因此不会产生类似于 CMMB 信号的多普勒模糊带。

4 模糊副峰抑制

在上一节的基础上,这里提出抑制模糊副峰的方法。为了消除循环前缀置零后出现的多普勒副峰,本文采取组合副峰抑制方法,如图6所示。

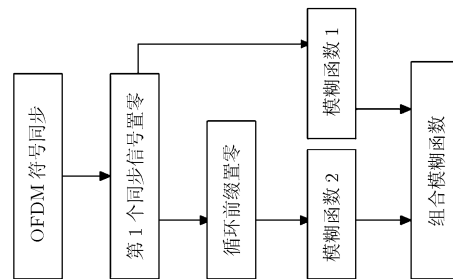


图6 CMMB 信号模糊函数副峰抑制流程图

按照图6中的流程,CMMB 信号同步后,首先将信标中第1个同步信号置零,用以消除同步信号引起的多普勒模糊带,得到模糊函数1,如图7(a)所示,此时循环前缀副峰仍然存在。在此基础上,再将循环前缀置零,得到模糊函数2,如图7(b),此时多普勒轴产生新的副峰。综合模糊函数1,模糊函数2,可以得到副峰完全抑制后的组合模函数,如图7(c)所示。

在无源探测中,利用直达波信号与目标回波信

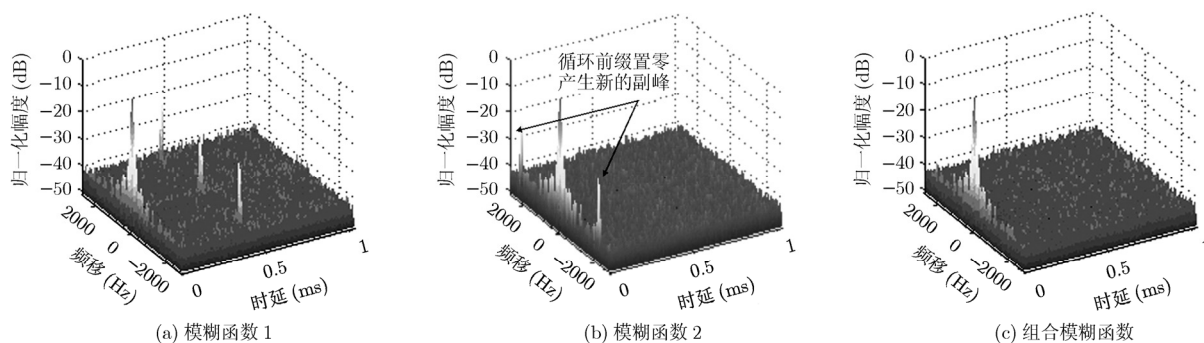


图7 CMMB 模糊函数副峰处理流程

号的相关性,可以检测目标的存在。根据互模糊函数峰值出现的位置,可以提取出目标距离和速度参数。CMMB 外辐射源雷达由于相关会产生副峰,这会导致难以辨别目标位置,并且强目标的副峰会掩盖弱目标的主峰,因此需要对直达波参考信号进行预处理,来消除副峰对探测性能的影响。

由于目标信号的不可预知性,我们无法对其中的同步信号和循环前缀进行处理,要防止副峰的干扰,需要在图6的处理流程上作一些改变:(1)为了消除目标信号中同步信号的影响,应同时将两个同步信号置零;(2)为了对消回波信号中的循环前缀,在直达波信号循环前缀置零的同时,应将有效部分的最后与循环前缀对应的一段置零。处理流程如图8所示。

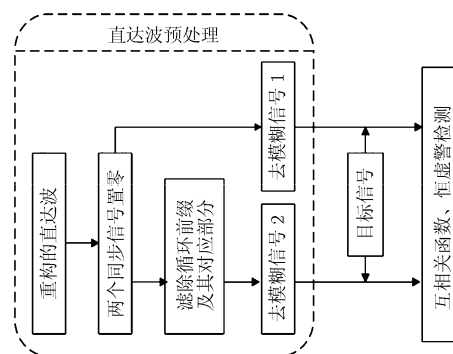


图8 CMMB 外辐射源雷达信号处理流程图

5 结束语

本文首先介绍了 CMMB 信号结构,接着从外辐射源探测的角度,具体分析了同步信号部分和循环前缀部分对信号探测性能的影响。经过分析发现,

循环前缀导致副峰的产生, 而多普勒模糊带的出现则是由信标中的同步信号引起的, 针对这两类模糊因素, 提出了一种抑制模糊的方法。仿真和实测结果表明了本文采用的副峰抑制方法能有效抑制 CMMB 信号模糊函数副峰, 为基于 CMMB 信号的外辐射源雷达目标探测奠定了理论基础。本文的 CMMB 外辐射源雷达信号处理流程只考虑了模糊函数副峰的影响, 而未考虑实际中的多径、直达波泄露等因素的影响。目前已建立了多通道 CMMB 外辐射源探测系统, 今后将重点结合实测数据对目标探测算法进行改进与完善。

参 考 文 献

- [1] Yik Ling Lim. A radar signal simulator for DAB based passive radar[C]. Radar Conference-Surveillance for a Safe World, Bordeaux, 2009: 1-5.
- [2] Coleman C and Yardley H. DAB based passive radar: performance calculations and trials[C]. International Radar Conference, Adelaide SA, 2008: 691-694.
- [3] Gao Zhi-wen, Tao Ran, and Wang Yue. Analysis and side peaks identification of Chinese DTTB signal ambiguity functions for passive radar [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(8): 1409-1417.
- [4] Radmard M, Behnia F, and Bastani M. Cross ambiguity function analysis of the '8k-mode' DVB-T for passive radar application [C]. IEEE Radar Conference, Washington, 2010: 242-246.
- [5] 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.
- [6] Gao Zhi-wen, 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.
- [7] Harms H A, Davis L M, and Palmer J. Understanding the signal structure in DVB-T signals for passive radar detection[C]. IEEE Radar Conference, Washington, 2010: 532-537.
- [8] Christiansen J M and Olsen K E. Range and Doppler walk in DVB-T based passive bistatic radar[C]. IEEE Radar Conference, Washington, 2010: 620-626.
- [9] Saini R and Cherniakov M. DTV signal ambiguity function analysis for radar application [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 133-142.
- [10] GY/T 220.1-2006, 移动多媒体广播第 1 部分: 广播信道帧结构、信道编码和调制[S]. 中国移动多媒体标准, 2006.
- [11] GY/T 220.1-2006, Mobile multimedia broadcasting part 1: framing structure, channel coding and modulation for broadcasting channel[S]. China mobile multimedia broadcasting standard, 2006.
- [12] EN 300 744 V1.5.1, Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television[S]. European Telecommunications Standards Institute, 2004.
- [13] Richards M A 著, 刑孟道, 王彤, 李真芳, 译. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 135-136.

万显荣: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为新体制雷达系统与雷达信号处理、阵列信号处理等。

岑 博: 男, 1988 年生, 硕士, 研究方向为雷达信号处理。