

中国移动多媒体广播外辐射源雷达参考信号获取方法研究

万显荣* 岑博 易建新 方亮 柯亨玉
(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘要: 该文结合中国移动多媒体广播(CMMB)信号的特殊结构,提出了两种 CMMB 外辐射源雷达参考信号获取方法,即基于 CMMB 同步信号的自适应滤波提纯算法与利用 CMMB 调制解调理论的参考信号重构算法。首先给出了两种算法的具体处理流程;接着通过计算机仿真重点分析比较了两种算法的性能,利用实测处理验证了重构算法的有效性。研究表明基于参考信号重构的提纯方法能有效地消除参考信号中的噪声干扰和多径干扰,具有获取参考信号纯度高、算法稳健等优点。

关键词: 外辐射源雷达; 参考信号重构; 中国移动多媒体广播(CMMB)

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0338-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00572

Reference Signal Extraction Methods for CMMB-based Passive Bistatic Radar

Wan Xian-rong Cen Bo Yi Jian-xin Fang Liang Ke Heng-yu
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: According to the special structure of China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB) signal, this paper presents two methods for reference signal extraction in passive bistatic radar system based on CMMB signal, the adaptive filter algorithm based on the sync signal of CMMB and the method of reference signal reconstruction based on the theory of modulation and demodulation for CMMB signal. The specific processes of the two proposed algorithms are studied first. And next, the performance of the two methods in the typical multipath environment is compared through simulation and real data verifies the effectiveness of the reconstruction method. Analysis demonstrates that signal reconstruction method can eliminate the multipath clutter and interference in the reference signal more effectively, which indicates that this method can extract the reference signal with high purity and the algorithm is more robust.

Key words: Passive radar; Reference signal reconstruction; China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB)

1 引言

外辐射源探测是一种利用第三方发射的电磁信号来实现目标探测和跟踪的雷达新体制,因其具有良好的“四抗”性能近年来受到了国内外学者的广泛重视^[1-5]。随着数字广播电视在全球日益普及并逐步取代模拟信号,利用数字音频广播(Digital Audio Broadcasting, DAB)、数字视频广播(Digital Video Broadcasting, DVB-T)等信号的无源探测已成为新体制外辐射源探测的研究热点^[6-9]。2006年,国家广播电视总局推出了基于我国国情的数字移动多媒体视频广播^[10](China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB)行业标准。CMMB 近年在我

国获得蓬勃发展,目前信号已覆盖全国 320 个主要城市,这为我国研究新体制外辐射源雷达提供了极好的条件。

外辐射源雷达利用监测通道目标信号与参考通道直达波信号二者相关性实现目标的探测,其中参考信号获取是外辐射源雷达信号处理的核心环节,参考信号的纯净程度直接决定着雷达探测性能的好坏。CMMB 采用单频网结构,多台发射机以相同的频率发射同样的节目数据,因此较传统模拟波形外辐射源雷达而言参考通道多径现象更为严重。传统基于模拟波形的辐射源雷达参考信号提纯通常采用空域波束形成、时域自适应滤波等多径抑制技术^[11,12]。欧洲现已普及 DAB 和 DVB-T 信号,基于数字广播电视信号的外辐射源雷达技术已走在世界前列,O'Hagan 等人^[13]与 Baczyk 等人^[14]分别研究了 DAB 和 DVB-T 外辐射源雷达中基于信号重构的参

2011-06-13 收到, 2011-09-19 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 xrwan@whu.edu.cn

考信号获取方法。本文针对我国 CMMB 信号的特殊结构，首先研究了利用 CMMB 同步信号的自适应滤波提纯算法，分析了该算法可行性与不足之处；接着提出了基于 CMMB 发射信号重构获取纯净参考信号的方法；最后分析并比较了两种算法的性能并通过实测信号对重构算法进行了验证。

2 CMMB 信号

CMMB 物理层输入数据流经过前向纠错编码、交织和星座映射，与离散导频和连续导频进行复接，然后进行正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制。调制后的信号插入帧头形成物理层信号帧，经基带至射频变换后发射^[10]。CMMB 系统物理层功能如图 1 所示。里德-索罗蒙(Reed-Solomon, RS)编码、字节交织、低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)码和比特交织共同构成了 CMMB 物理层信道编码部分，两级编码结构是 CMMB 信号正确解调的基础，同时也为无源探测参考信号在低信噪比下正确重构提供了保障；两级交织将传输比特进一步随机化，使得探测信号性能与具体节目数据流无关，这也是基于 OFDM 调制的数字波形外辐射源雷达相对传统模拟波形外辐射源雷达的突出优势之一。

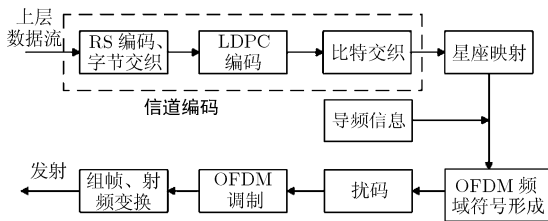


图 1 物理层功能框图

CMMB 物理层信号 1 帧持续时间为 1s，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 2 所示。

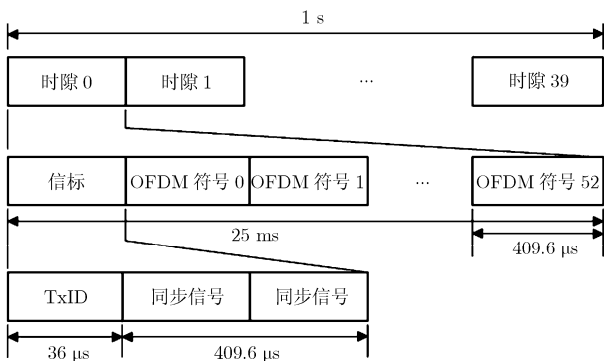


图 2 CMMB 信号帧结构

CMMB 信号一个符号可表示为

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

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。CMMB 信号模糊函数由一个主峰和多个副峰组成，对模糊函数进行去模糊处理^[9]，得到“图钉形”的单峰值模糊函数，如图 3 所示。

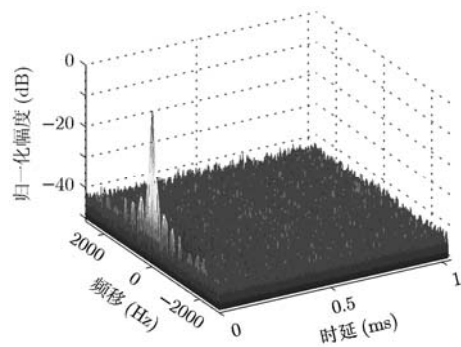


图 3 去模糊处理后 CMMB 信号模糊函数图

3 基于 CMMB 同步信号的自适应滤波提纯算法

3.1 参考通道信号模型

与传统无源雷达信号模型一致，接收天线获得的参考通道信号由纯净的直达波信号和多径干扰信号以及噪声叠加而成，信号模型如式(2)所示。

$$y(t) = s(t) + \sum_{k=1}^N \lambda_k s(t - \tau_k) + n(t) \quad (2)$$

其中 $y(t)$ 是参考通道信号， $s(t)$ 是需要提取的纯净直达波， N 是多径条数， λ_k 和 τ_k 分别表示第 k 条多径的反射系数和相对 $s(t)$ 的延迟， $n(t)$ 为噪声。

自适应滤波提纯直达波的核心思想是通过滤波器滤除直达波多径干扰信号来得到较为纯净的参考样本。为得到 $s(t)$ ，需构造滤波器，输入为 $y(t)$ ，输出是 $s(t)$ 的估计值 $\hat{s}(t)$ ，如式(3)。

$$\hat{s}(t) = \sum_{k=0}^{M-1} w_k y(n - k) \quad (3)$$

式(3)中，用离散序号 n 代替了连续时间 t ， $\mathbf{w} = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{M-1}]^T$ 是滤波器抽头系数， M 为滤波器阶数。

3.2 基于同步信号的自适应提纯算法

CMMB 信号每个时隙信标中含有两个完全相

同的同步信号,并且同步信号传输的内容是事先已知的,这相当于为我们提供了一个训练序列,利用这个训练序列可实时捕获信道的变化,求取滤波器的抽头系数 \mathbf{w} ,构造滤波器。将该滤波器应用于 CMMB 数据符号部分,如式(3),即可滤除参考信号中的多径干扰信号。

同步信号求取滤波器系数需采用自适应算法,本文选取递归最小二乘方(RLS)算法^[15],具体计算流程如下步骤所示:

步骤1 初始化: $\mathbf{w}(0)=0$, $\mathbf{T}(0)=\delta^{-1}\mathbf{I}$,其中 δ 是一个很小的值,本文取 $\delta=0.01$, \mathbf{I} 为 M 阶单位阵。

步骤2 迭代更新: $n=M, M+1, M+2, \dots$

$$\mathbf{u}(n)=[y(n) \ y(n-1) \ \dots \ y(n-M+1)]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{e}(n)=s(n)-\mathbf{w}^H(n-1)\mathbf{u}(n) \quad (5)$$

求取下一时刻的滤波器抽头系数:

$$\mathbf{k}(n)=\frac{\mathbf{T}(n-1)\mathbf{u}(n)}{\lambda+\mathbf{u}^H(n)\mathbf{T}(n-1)\mathbf{u}(n)} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}(n)=\frac{1}{\lambda}[\mathbf{T}(n-1)-\mathbf{k}(n)\mathbf{u}^H(n)\mathbf{T}(n-1)] \quad (7)$$

$$\mathbf{w}(n)=\mathbf{w}(n-1)+\mathbf{k}(n)\mathbf{e}^*(n) \quad (8)$$

其中 $\mathbf{w}(n)$ 为 n 时刻的滤波器系数, $\mathbf{u}(n)$ 是 n 时刻的输入, $\mathbf{e}(n)$ 是预测误差,RLS自适应算法就是根据预测误差来自适应调整 $\mathbf{w}(n)$, $\mathbf{k}(n)$ 是增益因子, λ 为遗忘因子。

自适应滤波算法利用同步信号来获取信道特征,并将其用于 CMMB 数据部分。自适应滤波器系数仅用同步信号就可获得,算法效率较高。该算法在多径数目少,多径延迟相对密集的条件下有较好的性能。但算法要求数据部分传送期间的信道特征和训练序列传输时基本相同,在实际应用中,这一点可能较难满足,这就使得利用同步信号估计的信道特征直接应用于数据部分时可能会引起畸变。另外,RLS自适应滤波算法对信号中的噪声未作过多的处理,这在一定程度上也影响了信号的相关性。

OFDM 技术有很强的抗多径衰落和窄带噪声的能力,参考信号提取应该充分利用信号结构本身的优势,为此,在深究 CMMB 信号形成机制的基础上,本文重点研究基于 CMMB 发射信号重构的参考信号提取方法。

4 基于 CMMB 调制解调理论的直达波重构方法

4.1 重构流程

CMMB 信号重构,就是根据 CMMB 信号调制

解调流程,从接收到的信号中恢复出尽可能准确的发射信号,具体流程如图4所示。采样得到的 CMMB 参考通道信号经过同步、信道估计、信道解码等处理,恢复出误码率尽可能低的二进制比特流,然后再经过图1所示的物理层功能流程完成信号的重构。

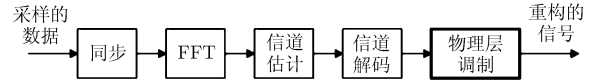


图4 CMMB 信号重构流程图

4.2 重构关键技术

同步和信道估计是信号重构的关键,直接影响参考信号的质量。同步的主要任务是获取信号的帧起点,估计出混频过程中出现的频率偏差和采样过程中引进的采样误差,并对其进行补偿。频率偏差和采样误差会影响同步结果,增大信道解码的误码率,降低重构信号的准确性。正如前面方法所述,CMMB 信号每个时隙中包含了两个完全相同的同步信号,利用加窗检测峰值的方法可以捕获同步信号的位置,见式(9)。

$$R(n)=\left|\sum_{i=n}^{n+N_{\text{sync}}} s(i) \times s^*(i+N_{\text{sync}})\right|, 1 \leq n \leq 2N \quad (9)$$

其中 n 对应采样点的序号, N_{sync} 为同步信号的长度, $s(i)$ 是采样得到 CMMB 信号, N 为1个时隙的 CMMB 信号长度。为保证能获取两个完整的同步信号,这里取滑动长度为 $2N$ 。在求得同步信号起始位置后,就可利用同步信号估计出频率偏差,利用导频信息对频率偏差和采样率偏差进行跟踪估计。

信道估计的作用是估计出信号在传播过程中所经过信道的冲击响应。单频网 CMMB 信道多径现象尤为严重,频率选择性衰落普遍存在,因此,良好的信道估计是获取纯净比特流的关键步骤。CMMB 信道估计采用时频2维插值算法^[16],利用已知的离散导频的值,求取离散导频处的子载波冲击响应,然后根据离散导频在时域和频域两个方向的排列规律,通过插值算法估计出数据子载波处的响应,再按式(10)对信号进行均衡处理。

$$X_{l,k}=\frac{Y_{l,k}}{\hat{H}_{l,k}}=\frac{Y_{l,k}}{H_{l,k}+N_{l,k}} \quad (10)$$

其中 l 和 k 分别表示 OFDM 符号的符号序号和子载波序号。将时域信号变换至频域,得到 OFDM 子载波的值,进行均衡处理。 $X_{l,k}$ 是均衡后的数据子载波, $Y_{l,k}$ 是均衡前的子载波, $\hat{H}_{l,k}$ 是估计出的频域响应,由真实的响应值 $H_{l,k}$ 和估计噪声 $N_{l,k}$ 两部分构

成。

无论是同步还是信道估计得到的都只是复调制数据，要得到二进制比特流，还需要经过解星座映射和信道解码。CMMB 信号的解星座映射采用软解调算法，即利用得到的复调制数据计算每一个比特的对数似然比。令信道估计后的频域复符号为 $r = x + jy$ ，式 (11)-式 (13) 分别给出了 BPSK, QPSK 和 16QAM 的软解调输出^[17]，显然，BPSK, QPSK, 16QAM 映射方式的复调制数据分别对应 1 bit, 2 bit, 4 bit 的似然比。

$$\text{LLR}(c) = -2x/\sigma^2 \tag{11}$$

$$\text{LLR}(c_1) = -2x/\sigma^2, \text{LLR}(c_0) = -2y/\sigma^2 \tag{12}$$

$$\text{LLR}(c_m) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2} [\min(x - S_1^m)^2 - \min(x - S_0^m)^2], & m=2,4 \\ \frac{1}{\sigma^2} [\min(y - S_1^n)^2 - \min(y - S_0^n)^2], & n=1,3 \end{cases} \tag{13}$$

其中 $\text{LLR}(c_i)$ 表示第 i 个比特对应的输出对数似然比， σ^2 是噪声方差。在 16QAM 映射方式中， S_1^i 和 S_0^i 分别表示第 i 个比特为 1 和 0 时所对应的星座图上点的集合。

解星座完成后，对软解调输出的对数似然比进行信道解码，得到比特流。CMMB 信道解码需经过解比特交织，LDPC 解码，RS 解码和解字节交织几个阶段。通过解码纠正错误比特后，再按图 1 所示流程将比特信息通过信道编码，调制到 OFDM 子载波上，形成最终重构的直达波信号。

5 参考信号获取算法性能分析与比较

5.1 重构算法与误码率性能分析

本小节验证重构算法在低信噪比(高斯信道)下的重构性能。图 5 给出了两种情形下 QPSK 映射方式在不同信噪比下的误码率统计曲线：(1)经过信道解码；(2)不经过信道解码而直接硬判决。图中曲线表明，信道解码可以大大降低传输比特的误码率，在较低的信噪比下(4 dB)，误码率即可达到 0，这

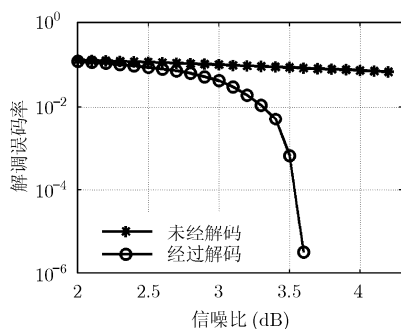


图 5 误码率随信噪比变化统计曲线

显示了重构算法的稳健性。图 6 表示重构信号与原始信号相关峰值信噪比随误码率的变化曲线，可以看到，峰值信噪比随误码率的变化并不敏感，但误码率对基于重构信号抑制直达波的效果有较大影响^[14]，并且随着误码率的进一步增大(大于 10^{-2})，峰值信噪比下降较明显，这要求在重构过程中将误码率尽可能降低。

5.2 提纯性能比较

由于参考信号与多径信号具有较强的相关性，基于此，下面来验证以上两种参考信号获取算法的有效性，并比较二者的提纯性能。仿真信道采用经典巴西信道 A 模型，具体参数如下：各路径相对幅度分别为 [1 0.2045 0.1548 0.1790 0.2078 0.1509]，延时点数分别为 [0 2 22 30 58 59]。仿真多径信号信噪比为 25 dB。分别利用参考信号与多径信号、滤波处理后的信号以及重构的信号相匹配，绘制距离多普勒谱，比较它们的零多普勒截线，如图 7 所示。不失一般性并考虑到计算量，这里自适应滤波算法采用 80 阶滤波器。

由图 7(a)可见，多径信号的存在引起了距离谱上的副峰。经过自适应滤波后的多径信号幅度有明显的衰减，这表明自适应滤波算法能有效地抑制多径信号。但多径副峰并没有完全消失，并且信号经过滤波器引起了延时。如要进一步提高滤波性能，必须增加滤波器的阶数，这无疑将增加信号延时和降低运算效率。而重构的方法则基本上不受多径的影响，只要多径延时在循环前缀长度内，没有引起符号间干扰，就可恢复出原始的发射信号，如图 7(b)所示。另外，由于重构算法通过信道解码能够恢复出低误码的比特流，大大降低了噪声对算法性能的影响。因此，相比自适应滤波算法，基于参考信号重构的算法具有更为稳健的性能，能够提取出更纯净的参考信号。

5.3 重构算法实测试证

武汉大学电波传播实验室已研制 CMMB 外辐

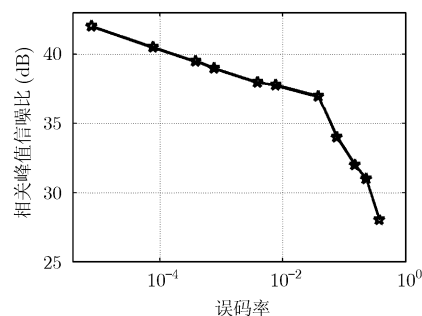


图 6 峰值信噪比随误码率变化曲线

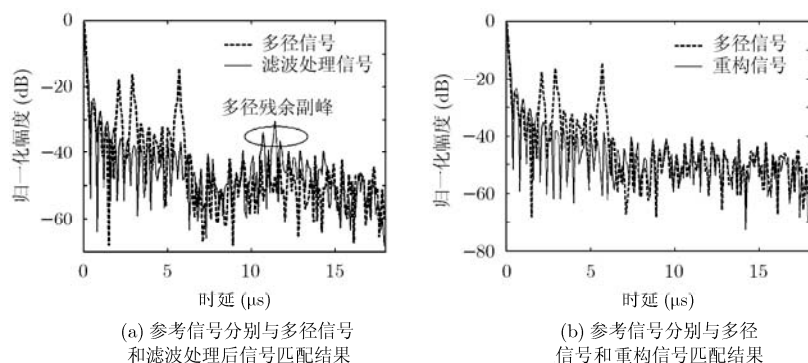


图 7 参考信号获取算法性能比较

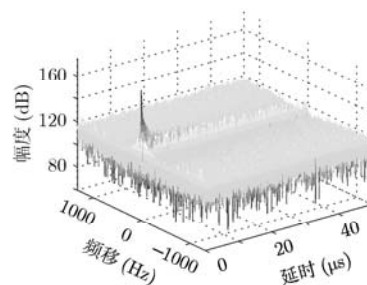


图 8 重构信号与原始信号相关谱

射源雷达接收系统。为前期理论研究的方便, 实验室专门购买了 CMMB 信号发生器, 信号频率、功率和节目内容可任意定制。在室内进行闭环实验, 利用多通道数字接收机采集经模拟前端输出的 CMMB 信号(中频 60 MHz, 带宽 8.5 MHz), 采样率为 80 MHz, 经数字下变频得到 10 MHz 的基带 IQ 实测信号。按照图 4 的处理流程对该信号进行重构, 为验证上述算法重构参考信号的性能, 利用重构信号与 CMMB 信号源产生的原始信号绘制相关谱图, 如图 8 所示。较高的峰值信噪比显示了良好的信号相关性, 从实验角度验证了重构参考信号的有效性。

6 结束语

文中结合 CMMB 外辐射源雷达特殊的信号结构, 将传统自适应滤波原理应用于参考信号提纯中, 分析了其可行性和不足之处。在此基础上, 根据 CMMB 信号调制解调原理, 研究了通过 CMMB 信号重构来获取参考信号的方法。仿真结果表明, 两种算法均能较有效地抑制参考通道中的多径信号。但由于单频网结构中 CMMB 信号多径现象较为严重, 自适应滤波提纯算法有其局限性, 而充分利用了 OFDM 信号抗多径和抗噪声优点的信号重构算法可以很好地适应这种信道环境, 是一种行之有效的 CMMB 外辐射源雷达参考信号获取方法。

参考文献

- [1] Olsen K E and Woodbridge K. Analysis of the performance of a multiband passive bistatic radar processing scheme[C]. Wave Diversity and Design Conference, Niagara Falls, ON, 2010: 142-149.
- [2] Howland P E, Maksimiuk D, and Reitsma G. FM radio based bistatic radar [J]. *IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 107-115.
- [3] Wang H, Wang J, and Zhong L. Mismatched filter for analogue TV-based passive bistatic radar [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2011, 5(5): 573-581.
- [4] 朱家兵, 洪一, 陶亮, 等. 基于自适应分数延迟估计的 FM 广播辐射源雷达直达波对消[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1674-1677.
Zhu Jia-bing, Hong Yi, Tao Liang, et al. Direct-path cancellation to FM broadcast transmitter radar based on adaptive fractional delay estimation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1674-1677.
- [5] 宋杰, 何友, 蔡复青, 等. 基于非合作雷达辐射源的无源雷达技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2151-2156.
Song Jie, He You, Cai Fu-qing, et al. Overview of passive radar technology based on non-cooperative radar illuminator [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(9): 2151-2156.
- [6] Yik L L. A radar signal simulator for DAB based passive radar [C]. Radar Conference-Surveillance for a Safe World, Bordeaux, 2009: 1-5.
- [7] Harms H A, Davis L M, and Palmer J. Understanding the signal structure in DVB-T signal for passive radar detection[C]. IEEE Radar Conference, Washington, 2010: 532-537.
- [8] 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.
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.
- [9] 何缓, 柯亨玉, 万显荣, 等. 基于双基地海洋回波谱仿真数据的海浪波数谱反演[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2477-2482.
He Huan, Ke Heng-yu, Wan Xian-rong, et al. Inversion of wave-number spectrum from simulated bistatic high-frequency radar data[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2477-2482.
- [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.
- GY/T 220.1-2006, Mobile multimedia broadcasting part1: framing structure, channel coding and modulation for broadcasting channel [S]. China mobile multimedia broadcasting standard, 2006.
- [11] Song Jie, He You, Guan Jian, *et al.* Direct wave estimation of non-cooperative bistatic pulse radar using LMS adaptive filter[C]. Chinese Control and Decision Conference, Guilin, 2007: 2879-2882.
- [12] Colone F, Cardinali R, Lombardo P, *et al.* Space-time constant modulus algorithm for multipath removal on the reference signal exploited by passive bistatic radar[J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2009, 3(3): 253-264.
- [13] O'Hagan D W, Kuschel H, Heckenbach J, *et al.* Signal reconstruction as an effective means of detecting targets in a DAB-based PBR[C]. International Radar Symposium, Vilnius Lithuan, 2010: 48-51.
- [14] Baczyk M K and Malanowski M. Decoding and reconstruction of reference DVB-T signal in passive radar systems [J]. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2011, 57(1): 56-59.
- [15] 姚天任, 孙洪. 现代数字信号处理[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999: 62-63.
- Yao Tian-ren and Sun Hong. Modern Digital Signal Processing[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1999: 62-63.
- [16] 彭石, 颜永红, 黑勇, 等. 一种适用于 CMMB 系统的信道估计方法[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(3): 49-52.
- Peng Shi, Yan Yong-hong, Hei Yong, *et al.* A feasible method of channel estimation for the CMMB system[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2010, 30(3): 49-52.
- [17] 张浩, 冯贤光, 叶梧, 等. QAM 中基于 LLR 的软输出 Viterbi 译码器的实现[J]. 科学技术与工程, 2005, 5(14): 944-949.
- Zhang Hao, Feng Xian-guang, Ye Wu, *et al.* Implementation of Viterbi decoder based on LLR soft output in QAM scheme[J]. *Science Technology and Engineering*, 2005, 5(14): 944-949.
- 万显荣: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无源雷达系统、高频雷达系统及雷达信号处理等.
- 岑 博: 男, 1988 年生, 硕士, 研究方向为雷达信号处理.