

利用阵列天线的 CDMA 辐射源雷达目标检测方法

王海涛¹, 王 俊¹, 端 峰²

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071;
2. 空军驻华中地区军事代表室, 湖北 武汉 430060)

摘要: 针对码分多址(code division multiple access, CDMA)移动通信网中, 一个区域内存在多个 CDMA 基站以同样的频率发射不同的信号, 一般很难确定多个基站的能量强弱和方向, 提出一种利用阵列天线的 CDMA 辐射源雷达目标检测方法。利用级联相消消除各个基站的干扰。首先, 通过导频搜索确认每一阶段当前具有最强能量的基站, 并给出一种精确测量该基站方向的方法; 然后, 消去各个天线阵子接收到的该基站干扰, 再依次循环进行, 将各个基站干扰按能量从大到小依次消除, 直到干扰充分消除; 最后, 进行波束扫描和距离多普勒相关以检测目标。计算机仿真验证了该目标检测方法的有效性。

关键词: 外辐射源雷达; 码分多址; 阵列天线; 目标检测

中图分类号: TN 958. 97

文献标志码: A

DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-506X. 2012. 02. 12

Target detection for CDMA based passive radar using array antenna

WANG Hai-tao¹, WANG Jun¹, DUAN Feng²

(1. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Air Military Represent Office in Central China Region, Wuhan 430060, China)

Abstract: Within a system of code division multiple access (CDMA), in an area there exist multiple base stations which transmit different signals in the same frequency bandwidth. And usually it is difficult to identify the energy intensity and direction of these multiple stations. Aiming at this problem, a method of target detection for CDMA based passive radar using array antenna is proposed. This method uses a concatenation cancellation method to remove the inference of each base station. Firstly the strongest base station at each step is identified through pilot search and the direction of the station is measured accurately, then the interference of the station in each channel is canceled. Repeat this in turn according to the energy intensity of each station till the interference is suppressed sufficiently. Finally beamform and rang-Doppler correction are performed in order to detect the target. Computation simulation verifies the availability of this method.

Keywords: passive bistatic radar; code division multiple access (CDMA); array antenna; target detection

0 引言

外辐射源雷达本身不需要发射电磁波信号, 而是利用目标反射环境中已有的电磁波信号进行探测、定位与跟踪。外辐射源雷达因其具有不可探测性、结构简单、造价低廉以及具有反隐身的潜力等优点, 近年来在国内外引起了广泛关注^[1-3]。目前, 国内外研究的可以作为外辐射源雷达机会照射源的信号包括: 调频广播^[4]、模拟/数字电视信号^[5-7]、全球移动(global system for mobile, GSM)^[8-9]通信信号等。

近几年来, 码分多址(code division multiple access, CDMA)

移动通信网发展十分迅速, CDMA 基站呈蜂窝结构分布在广大区域。因此, 利用 CDMA 信号作为外辐射源雷达机会照射源信号具有以下两个显著的优点: 一是这种机会照射源的发射站十分丰富; 二是可以利用多个发射站构成一个无源雷达组网系统以提高对目标的探测性能。另外, CDMA 的前向链路信号具有伪随机特性, 其模糊函数为图钉形状, 因此可以获得较好的距离和速度分辨率^[10]。

但是, 相对于以调频广播或者数字电视作为机会照射源的外辐射源雷达而言, CDMA 系统由于采用码分多址, 在同一个区域内存在多个发射站以同样的频率发射不同的

收稿日期: 2011-05-19; 修回日期: 2011-09-15。

基金项目: 国家部委重点基金(9140A07050908DZ0103); 国防重点实验室基金(9140C010507100C01); 教育部创新团队计划(IRT0954)资助课题

作者简介: 王海涛(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为外辐射源雷达信号处理。E-mail: haitao267@yahoo.com.cn

信号,这就导致以 CDMA 信号作为机会照射源的外辐射源雷达面临更严重的杂波干扰。文献[10-11]提出应用级联相消的方法消除这多个同频基站的直达波和多径干扰信号。特别地,文献[11]提出了一种直接利用前向链路发射的导频信号进行目标检测的方案,同时使用“簇”的方法实现基站与多径时延的匹配。利用导频信号实现对目标的检测,可以充分利用导频序列良好的自相关性质,但在 CDMA 前向链路中,除了导频信号外,还有寻呼信号、同步信号、业务信号。因此,只使用导频信号,将存在其他信号的多址干扰。文献[10]使用单天线方案,利用前向链路的全信号实现对目标的检测,但需要对接收信号进行解调。本文给出了一种利用阵列天线的 CDMA 辐射源雷达目标检测方法,该方法也利用前向链路的全信号,并且不需要知道接收站附近 CDMA 基站的先验信息。目标检测方法流程图如图 1 所示。首先通过导频搜索方式获得接收站附近各个基站导频的强度;然后测量发射最强导频的基站的方向,再形成一个指向该基站方向的波束以获得基站的直达波信号,以消除各个通道中这个基站的直达波和多径干扰,再依此循环进行消去其他基站的干扰,直到干扰得到充分的消除;接着利用剩余的信号在可能存在目标的空域作波束扫描;最后作距离多普勒二维相关以检测目标。该方法既可以只利用一个基站的信号进行目标检测(也就是每个阶段相消后的信号只跟主基站(具有最强直达波的基站)的直达波信号作距离多普勒二维相关),也可以利用多个基站的信号进行目标检测。本文只介绍利用一个基站的信号进行目标检测的情况,多个基站的情况可以依此类推。

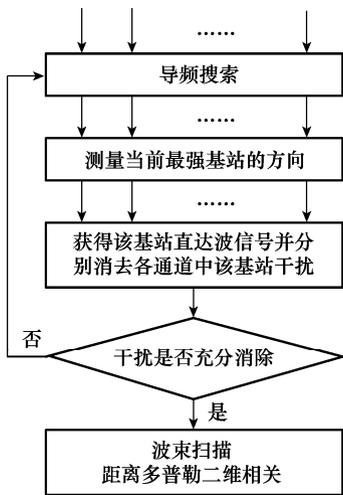


图 1 目标检测方法流程图

1 信号模型

本文考虑以一个 8 阵元的线阵(阵元间距为半波长)作为接收天线。数据被天线接收下来以后,各个通道的数据分别经过模数转换、数字下变频、滤波等处理以后转换为数字基带信号,于是每个阵元接收的信号可以表示为如下模型:

$$s_i[n] = \sum_{h=1}^{N_s} \omega_h d_h[n] e^{j\phi_{h,i}} + \sum_{l=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{N_{l,c}} a_{l,m} d_l[n - \tau_{l,m}] e^{j\phi_{l,m,i}} + \sum_{l=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_{l,T}} b_{l,t} d_l[n - \tau_{l,t}] e^{j2\pi f_{l,t} n / f_s} e^{j\phi_{l,t,i}} + z_i[n],$$

$$i = 1, \dots, 8; n = 1, \dots, N \quad (1)$$

式中, N 为总的采样数; f_s 为采样频率(本文中设定的采样速率 f_s 为 CDMA 信号码片速率,即为 1.228 8 MHz); i 为天线阵元数; N_s 为接收机附近 CDMA 基站数; $d_h[n]$ 为第 h 个 CDMA 基站的直达波信号; ω_h 为天线接收到的第 h 个 CDMA 基站的直达波信号的幅度; $N_{l,c}, N_{l,T}$ 分别为第 l ($l=1, \dots, N_s$) 个 CDMA 基站的杂波总数和目标回波总数; $a_{l,m}, \tau_{l,m}$ 分别为第 l 个 CDMA 基站的第 m 个杂波的幅度和时延(相对于直达波信号); $b_{l,t}, \tau_{l,t}, f_{l,t}$ 分别为第 l 个 CDMA 基站的第 t 个目标回波的幅度,时延和多普勒频移; $e^{j\phi_{h,i}}, e^{j\phi_{l,m,i}}, e^{j\phi_{l,t,i}}$ 分别为对应的基站直达波,多径和目标的方向相位信息; $z_i[n]$ 为第 i 个阵元中的热噪声。

从式(1)可以看出,由于 CDMA 系统采用的是码分多址,天线可以接收到多个基站以同样频率发射的不同信号,因此如果只对消其中一个基站的直达波和多径干扰,其他基站的直达波和多径干扰仍然会掩盖目标回波,导致检测不到目标。因此,需要采用级联相消的方法消除这多个基站的干扰。本文中相消方法的基本思想是先消除能量最强的基站的干扰,然后是次强的基站干扰信号,依次进行,直到干扰充分消除。

2 导频搜索

在 CDMA 系统中,前向链路信道是指由基站发往移动台的信道。CDMA 前向链路由 1 个导频信道、1 个同步信道、至多 7 个寻呼信道以及一些业务信道构成。其中不同基站使用相同的伪噪声(pseudonoise, PN)序列,但各基站 PN 序列的起始位置不同,即 PN 偏移系数不同(有关 CDMA 系统中前向链路的具体结构,可以参考文献[12])。因此,可以通过导频的搜索的方式来确定当前信号中各基站信号的强弱。导频搜索就是用天线接收的信号与本地导频 PN 序列作相关,即可以由如下公式表示^[12]:

$$p_1(k) = \sum_{n=0}^{N_p-1} s_1[n] c[n+k], k = 0, \dots, N_p - 1 \quad (2)$$

式中, $c[n]$ 为本地导频 PN 序列; k 为导频偏移数; N_p 表示为一个导频 PN 序列周期。需要注意的是,本文中选用的是第一个通道中的信号进行导频搜索,实际情况下可以选择任意一个通道进行导频搜索。

3 基站直达波信号获取

在以调频广播或者数字电视作为机会照射源的外辐射源雷达中,不同的基站发射的是不同频率的信号(调频广播),或者不同的基站以同样的频率发射同样的信号(数字电视),因此只需要获得主基站的直达波信号。而在以 CDMA 作为机会照射源的外辐射源雷达中,不同的基站以

同样的频率发射不同的信号,因此为了对消不同基站的干扰信号,必须获得所有基站的直达波信号。本文利用一套阵列天线既作为参考天线又作为监视天线,各个基站的直达波信号获取是通过形成一个波束指向基站方向,这就需要知道接收站附近每个 CDMA 基站的方向。由于 CDMA 系统采用码分多址,一个区域内可以接收到众多的 CDMA 基站信号,因此很难预先准确知道接收站附近 CDMA 基站数量、各个基站方向以及信号强度。特别是当接收系统是一个机动式快速部署系统时,一般只知道主基站的位置。因此,首先通过上一节的导频搜索确定当前信号中的最强基站信号,测定这个最强基站的方向,再形成一个波束指向这个基站方向,获得基站直达波信号以后分别消去 8 个通道中这个基站的直达波和多径干扰;然后再依此循环进行,消去其他基站干扰直到干扰得到充分消除相消结束。下面给出测定基站直达波方向的方法。

假设通过第 2 节的导频搜索获得当前信号中最强基站为第 L 个基站,且该基站的直达波信号的导频偏移数为 k_L ,将 8 个通道中的信号分别乘以这个偏移数的导频序列后相加后得到

$$p_i(k_L) = \sum_{n=0}^{N_p-1} s_i[n]c[n+k_L], i = 1, \dots, 8 \quad (3)$$

根据式(1)可以把 $p_i(k_L)$ 写成如下形式

$$p_i(k_L) = \xi_{i,1} + \xi_{i,j} + \xi_{i,c} + \xi_{i,g} + \xi_{i,z} \quad (4)$$

式中, $\xi_{i,1}$ 表示基站 L 的直达波信号与导频序列相乘相加后的结果,即

$$\xi_{i,1} = \sum_{n=0}^{N_p-1} \omega_L d_L[n]c[n+k_L]e^{j\theta_{L,i}} \quad (5)$$

$\xi_{i,j}$ 表示其他基站(除了基站 L)的直达波信号与导频序列相乘相加后的结果,即

$$\xi_{i,j} = \sum_{h=1, h \neq L}^{N_s} \sum_{n=0}^{N_p-1} \omega_h d_h[n]c[n+k_L]e^{j\theta_{h,i}} \quad (6)$$

$\xi_{i,c}$ 表示各基站的杂波与导频序列相乘相加后的结果,即

$$\xi_{i,c} = \sum_{l=1}^{N_s} \sum_{m=1}^{N_{lc}} \sum_{n=0}^{N_p-1} a_{l,m} d_l[n - \tau_{l,m}]c[n+k_L]e^{j\theta_{l,m,i}} \quad (7)$$

$\xi_{i,g}$ 表示各基站的回波信号与导频序列相乘相加后的结果,即

$$\xi_{i,g} = \sum_{l=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{N_{l,T}} \sum_{n=0}^{N_p-1} b_{l,t} d_l[n - \tau_{l,t}]c[n+k_L]e^{j2\pi f_{l,t} n / f_s} e^{j\theta_{l,t,i}} \quad (8)$$

$\xi_{i,z}$ 表示各个阵元的噪声与导频序列相乘相加后的结果,即

$$\xi_{i,z} = \sum_{n=0}^{N_p-1} z_i[n]c[n+k_L] \quad (9)$$

由于第 L 个基站的直达波信号本来就具有最强的能量,同时又由于与式(3)相乘的导频序列的偏移数是与基站 L 的直达波信号的导频偏移数匹配,而与其他信号的导频偏移数失配。因此,经过式(3)的积累后基站 L 的直达波信号的能量将远远大于其他信号,也即式(4)可以约等为如下形式:

$$p_i(k_L) \cong \xi_{i,L} = \sum_{n=0}^{N_p-1} \omega_L d_L[n]c[n+k_L]e^{j\theta_{L,i}} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出导频搜索后,各阵元中的信号只相差一个当前最强基站的方向相位信息,因此该基站的方向可以经过波束扫描获得。

由式(11)进行波束扫描,最大峰值所在的位置就是当前最强基站方向。

$$\rho(\theta) = \mathbf{y}(\theta)^H \mathbf{P}(k_L) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{P}(k_L) = [p_1(k_L), \dots, p_8(k_L)]^T$; $\mathbf{y}(\theta)$ 为阵列导向矢量。

获得当前最强基站的方向后,形成一个指向这个基站方向波束便可获得这个基站的直达波信号:

$$\mathbf{s}_{\text{ref}}(n) = \mathbf{y}(\theta_L)^H \mathbf{s}(n), n = 1, \dots, N \quad (12)$$

式中, $\mathbf{s}(n) = [s_1(n), \dots, s_8(n)]^T$; θ_L 表示当前最强基站方向。

由于目标回波相对于直达波和多径干扰具有多普勒频移,因此利用这个性质,在获得基站的直达波以后,便可以分别把 8 个通道中有关这个基站的直达波和多径干扰分量消去,同时保证目标回波的能量不受大的影响。目前,国内外发展了很多有关干扰相消的算法,如文献[13-14],本文使用文献[14]中的扩展批处理相消算法(batch version of extensive cancellation algorithm, ECA-B)。

4 目标检测

当干扰得到充分消除以后,便可以利用 8 个通道中的剩余信号在可能存在目标的空域内进行扫描:

$$\mathbf{s}_{\text{sur}}(n) = \mathbf{y}(\varphi)^H \mathbf{s}_c(n), n = 1, \dots, N \quad (13)$$

式中, φ 表示可能存在目标的方向; $\mathbf{s}_c(n)$ 为相消后剩余的 8 通道信号。

然后再与主基站的直达波信号作距离多普勒二维相关以检测目标:

$$\xi(\tau_d, f_d) = \sum_{n=1}^N \mathbf{s}_{\text{sur}}[n] \mathbf{s}_{\text{ref}}^*[n - \tau_d] e^{-j2\pi f_d n / N} \quad (14)$$

式中, τ_d, f_d 分别表示为时间单元和多普勒频移单元; $\mathbf{s}_{\text{ref}}(n)$ 表示基站直达波信号; * 表示取共轭。

5 仿真分析

为了验证本文方法的性能,在下文中将考虑表 1 所示的仿真参数。从表 1 可以看出,假设接收机一共接收到了 8 个 CDMA 基站发射的直达波和多径。在这 8 个 CDMA 基站中,基站 1 被设定为主基站,因为它具有最强的直达波信号。同时由于文中只考虑利用一个基站进行目标检测,因此在仿真参数中,假设只接收到了主基站的一个目标回波信号。值得注意的是,实际情况中,雷达有可能接收到多个目标的回波信号,但是在 CDMA 辐射源雷达中影响目标检测性能的决定性因素是基站的直达波和多径干扰,多目标的检测性能和单个目标类似,因此本文只考虑单目标情况。最后需要说明的是,在仿真过程中所使用的 8 个基站的直达波信号都是在外场实验中采集到的 CDMA 基站发射信号,而各个基站的的多径则是分别对基站直达波信号加时延获得的。

表 1 仿真参数

基站	信号	信噪比/dB	PN 偏移数	方向/(°)
基站 1	直达波信号	42	1 057	40
	多径 1	19	1 052	26
	多径 2	24	1 047	108
	多径 3	24	1 055	60
基站 2	目标回波信号	-25	1 007	100
	直达波信号	36	4 662	80
基站 3	多径 1	16	4 657	21
	直达波信号	26	19 258	120
基站 4	多径 1	6	19 253	52
	直达波信号	6	3 580	47
基站 5	直达波信号	16	2 139	36
基站 6	直达波信号	12	19 762	52
基站 7	直达波信号	4	9 767	11
基站 8	直达波信号	0.3	5 567	18

图 2 是直接对天线阵元 1 接收下来的信号按照式(2)进行导频搜索的结果图。图 2 中对本地导频一共作了 2^{15} 个码片偏移(也即一个导频周期)。从图 2 可以看出有两个明显的尖峰,其中 PN 偏移数为 1 000 左右的尖峰是由基站 1 的直达波信号引起的,而 PN 偏移数为 4 600 左右的尖峰则是由基站 2 的直达波信号引起的。从图 2 中获得最大尖峰的 PN 偏移数(也就是基站 1 的直达波信号 PN 偏移数)后,便可以按照式(3)和式(5)对基站 1 的方向作波束扫描,获得的扫描结果如图 3 所示。图 3 中最大峰值位于 40° 的地方,也即测得的基站 1 的方向为 40° ,这与仿真的基站 1 的方向一致。图 4 是利用 ECA-B 算法消去基站 1 的直达波和多径干扰后,形成一个波束指向目标方向再与基站 1 的直达波信号作距离多普勒二维相关获得的结果图(图中纵轴的幅度采用的是线性坐标,图 5 类同)。从图 4 可以看出,虽然将基站 1 的直达波和多径干扰完全消去,但是仍然检测不到目标,这是因为目标回波被其他基站信号所掩盖,因此需要进行级联相消,将其他较强的基站干扰信号也消除。

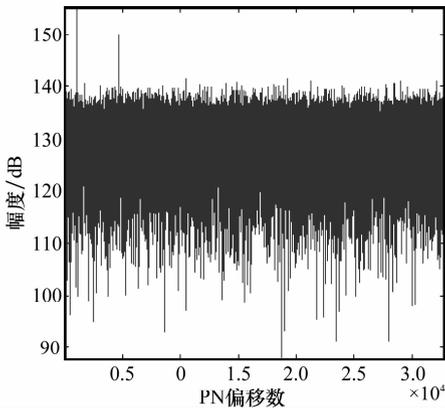


图 2 初始导频搜索结果

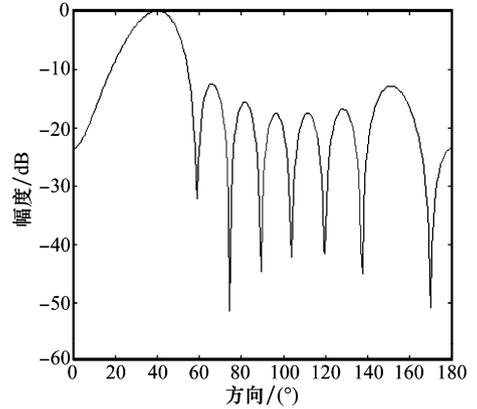


图 3 基站 1 方向波束扫描结果图

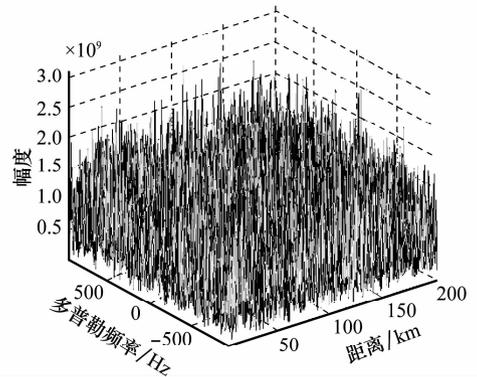


图 4 消去基站 1 的干扰后的二维相关结果图

图 5 是按照上述方法再依次消除基站 2 和基站 3 的直达波和多径干扰后在目标方向处进行波束形成,然后再与基站 1 的直达波信号作距离和多普勒二维相关获得的结果图,从图 5 可以明显看到一个由目标回波引起的尖峰。

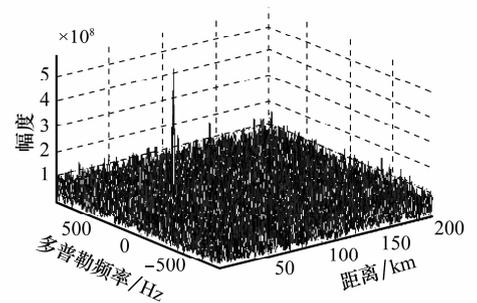


图 5 消去基站 1,2 和 3 的干扰后的二维相关结果图

6 结束语

本文提出了一种利用阵列天线的 CDMA 辐射源雷达目标检测方法。该方法通过导频搜索确认天线接收到的各个基站发射信号的强弱,以使得在相消过程中将各个基站信号由强到弱依次消除。同时,各个基站的直达波信号都是在消去前面相对较强的基站信号后获得的,因此利用一套阵列天

线就能获得多个基站的直达波信号。针对 CDMA 系统是码分多址系统,接收站附近 CDMA 基站较多,一般很难获得所有 CDMA 基站的方向信息。本文给出了一种测定 CDMA 基站方向的方法,该方法受其他基站信号和噪声影响较小,可以获得较精确的测向结果。仿真实验表明,该方法在存在多个基站的强干扰信号的情况下,利用一个八元阵列天线可以有效消除干扰并且检测到目标。

需要进一步研究的问题是如何确认干扰已经得到充分的消除。本文在仿真过程中认为,如果检测到了目标回波峰值,干扰就已经被充分消除,而在实际情况中天线可能接收到多个目标回波,也有可能接收不到一个目标回波。因此,需要寻找一种合适的级联相消终止准则,以使得尽可能检测到所有目标回波,同时能够在不可能再检测到目标的情况下,相消及时终止。

参考文献:

- [1] Howland P E. Special issue on passive radar systems[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, 2005, 152(3): 106 - 223.
- [2] 王俊, 保铮, 张守宏. 无源探测与跟踪雷达系统技术及其发展[J]. *雷达科学与技术*, 2004, 2(3): 129 - 135. (Wang J, Bao Z, Zhang S H. Passive detection/tracking radar system technologies and its development[J]. *Radar Science and Technology*, 2004, 2(3): 129 - 135.)
- [3] 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 J, He Y, Cai F Q, et al. Overview of passive radar technology based on non-cooperative radar illuminator[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(9): 2151 - 2156.)
- [4] Howland P E, Maksimimuk D, Reitsma G. FM radio based bistatic radar[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, 2005, 152(3): 107 - 115.
- [5] Howland P E. Target tracking using television-based bistatic radar[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, 1999, 146(3): 166 - 174.
- [6] Wang H T, Wang J, Zhong L P. Mismatched filter for analogue TV-based passive bistatic radar[J]. *IET Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(5): 573 - 581.
- [7] Saini R, Cherniakov M. DTV signal ambiguity function analysis for radar application[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, 2005, 152(3): 33 - 42.
- [8] Danny K P T, Sun H, Lu Y, et al. Passive radar using global system for mobile communication signal: theory, implementation and measurements[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, 2005, 152(3): 116 - 123.
- [9] Reda Z, Ulrich N. Range performance study of a GSM Passive radar system[C]// *Proc. of the International Radar Symposium*, 2009: 1 - 5.
- [10] 廖桂生, 李天星, 谷卫东, 等. 基于 CDMA 基站辐射源雷达的运动目标检测方法[J]. *现代雷达*, 2008, 30(9): 29 - 32. (Liao G S, Li T X, Gu W D, et al. Approach for passive radar MTD based on CDMA signal[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(9): 29 - 32.)
- [11] 田孝华, 廖桂生, 王洪洋. 基于 CDMA 蜂窝网的运动目标检测与定位技术[J]. *电波科学学报*, 2005, 20(3): 336 - 341. (Tian X H, Liao G S, Wang H Y. Moving target detection and location methods based on CDMA cellular networks[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(3): 336 - 341.)
- [12] Jhong S L, Leonard E M. CDMA 系统工程手册[M]. 许希斌, 周世东, 赵明, 等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 209 - 219. (Jhong S L, Leonard E M. *CDMA systems engineering handbook*[M]. Xu X B, Zhou S D, Zhao M, et al, trans. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2001: 209 - 219.)
- [13] 王俊, 赵洪立, 张守宏, 等. 非合作连续波雷达中存在强直达波河多径杂波的运动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2005, 33(3): 419 - 422. (Wang J, Zhao H L, Zhang S H, et al. Detection of moving targets in commercial illuminator based radar system with strong direct signal and multipath clutters presented[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 419 - 422.)
- [14] Colone F, O'hagan D W, Lombardo P, et al. Multistage processing algorithm for disturbance removal and target detection in passive bistatic radar[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 698 - 722.