

文章编号:1007-5321(2020)05-0143-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-008

# 低空小目标检测中的单通道干扰信号重构和抑制算法

石潇竹<sup>1</sup>, 杜洋帆<sup>2,3</sup>, 李晓辉<sup>1,2</sup>, 方 聪<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 空中交通管理系统与技术国家重点实验室, 南京 210007;

2. 西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 西安 710071;

3. 中国航天科技集团公司第九研究院第七七一研究所, 西安 710065)

**摘要:** 利用移动通信系统进行低空小目标检测时,传统被动检测算法无法实现单接收通道下参考信号接收对比,提出一种基于干扰信号重构的直达波抑制算法,用于对低空小目标的检测. 首先通过移动通信系统感知信道传输环境;在此基础上,利用 OFDM 时频特性重新构建直达波信号及多径信号等干扰信号,最后通过扩展相消算法对单接收通道中的直达波干扰进行抑制. 仿真结果表明,所提方法能在移动通信系统单接收通道情况下提高回波检测性能,提高低空小目标检测的准确性.

**关键词:** 低空小目标检测;移动通信系统;正交频分复用;直达波抑制

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

## Single Channel Interference Signal Reconstruction and Suppression Algorithm in Low Altitude Small Target Detection

SHI Xiao-zhu<sup>1</sup>, DU Yang-fan<sup>2,3</sup>, LI Xiao-hui<sup>1,2</sup>, FANG Cong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Air Traffic Management System and Technology,

The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China;

3. China Aerospace Science and Technology Corporation Ninth Research Institute 771 Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the traditional passive detection algorithm cannot achieve the reference signal reception under a single receiving channel when using mobile communication systems to detect low-altitude small targets, a direct wave suppression algorithm based on interference signal reconstruction was proposed for the detection of low-altitude small targets. Firstly, the mobile communication system is used to perceive the channel transmission environment. On this basis, the interference signals such as direct wave signal and multipath signal are reconstructed by using the time-frequency characteristics of orthogonal frequency division multiplexing. Finally, the direct wave interference in the single receiving channel is suppressed by the extended cancellation algorithm. The simulation results show that the proposed method can improve the echo detection performance and improve the accuracy of low-altitude small target detection in the case of single receiving channel of mobile communication system.

**Key words:** low-altitude small target detection; mobile communication system; orthogonal frequency division multiplexing; direct wave suppression

目前对于低空小目标的检测和追踪方法中,被动检测系统是研究热点之一. 被动检测系统利用现

收稿日期: 2020-01-29

基金项目: 空中交通管理系统与技术国家重点实验室开放基金项目(SKLATM201807)

作者简介: 石潇竹(1980—),男,研究员, E-mail:xidiashi1998@163.com.

有的电视信号<sup>[1]</sup>和移动通信信号等辐射源作为检测信号进行目标监测,因其覆盖容量大,易损性低,成本低,减少了对环境的电磁污染而重新受到关注<sup>[2]</sup>. 被动检测系统利用不同辐射源针对不同场景下的目标进行有效的定位<sup>[3]</sup>,如利用无线局域网(WLAN, wireless local area networks)实现近程被动检测的应用<sup>[4]</sup>. 但是对于低空小目标而言<sup>[5]</sup>,其速度慢,飞行高度低,反射性能差,使得低空小目标处于一个尴尬的地位. 可考虑通过移动通信网络正交频分复用(OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)信号作为低空小目标的检测信号,利用移动通信系统接收信号,并通过通信设备的信号处理完成对低空小目标的目标检测及追踪. 被动检测系统中直达波信号及多径信号的高强能量,使低空小目标回波变得难以检测,需要对接收信号中的直达波信号和多径信号进行抑制. 因此,人们提出了各种方法来解决这一问题. Silverio 等<sup>[6]</sup>提出的 CLEAN 算法可通过一系列迭代完成有用信息的获取; Tang 等<sup>[7-8]</sup>提出以最小均方(LMS, least mean square)为代表的自适应滤波器,通过将代价函数用于确定如何更改滤波器系数从而减小下一次迭代过程的成本,从而抑制接收信号中的直达波信号; Colone 等<sup>[9-12]</sup>提出的扩展相消算法(ECA, extensive cancellation algorithm)及其改进算法,通过将干扰信号作为正交投影矩阵完成直达波的干扰抑制. 由于传统被动定位系统中直达波抑制算法通常由参考信号通道信道和监测信号通道两部分组成. 参考信号通道记录了具有传输时延的传输信号,监测信号通道记录目标反射回来的回波信号.

采用移动通信系统进行低空小目标的检测和干扰抑制时,因现有移动通信系统的收发方式为不同天线对准不同的蜂窝小区,只有一个接收通道,则无法利用传统的被动检测算法. 此外,在低空城市环境中,目标回波信号受到多径的干扰影响,从而抑制算法会影响回波信号的检测和提取. 因此,通过移动通信系统在收发两端传输已知信号,利用 OFDM 符号的时频特性对检测环境进行感知,并根据感知结果提取直达波等干扰信号的信号特征和信号时延,通过本地序列完成直达波等干扰信号重构,并将该信号作为直达波抑制算法的参考信号,最终利用 ECA 的相关思想,对移动通信信号按照 OFDM 符号进行符号划分处理,将重构直达波信号中每个 OFDM 符号转化为直达波干扰的正交投影矩阵,并

分别对每个 OFDM 符号进行直达波干扰抑制. 针对自适应滤波器等方法下的抑制性能差和权值收敛慢等问题,所提算法能够有效地在结合移动通信系统的低空小目标检测系统下,对每个 OFDM 符号下的直达波干扰进行有效地抑制处理,实现低空小目标的检测追踪.

## 1 系统模型

利用移动通信系统下的收发设备对低空小目标进行检测,通过发射设备发送已知序列,一方面通过自由空间传播直接将信号发送至设备接收端;另一方面将信号通过低空小目标的反射至设备接收端,系统接收端在接收信号的同时同样会接收到城市低空环境中的静物多径回波及噪声. 系统接收端对信号进行处理后对低空小目标进行信号检测,定位服务器结合多台移动通信接收设备的检测信息,完成低空小目标的目标定位. 系统模型如图 1 所示.

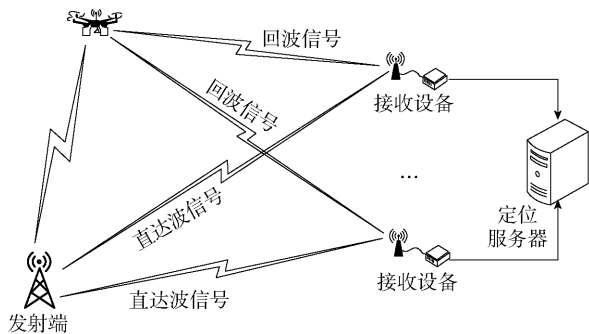


图 1 移动通信系统下的低空小目标检测系统模型

直达波信号和静物多径回波等干扰信号均会影响低空小目标回波信号的检测,因此,系统通过直达波抑制算法可抑制直达波信号干扰和城市静物多径回波,利用移动通信系统中所存在的 OFDM 符号完成目标检测. 发送一段收发端已知序列进行信号传输,其序列表达式为

$$S(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} a_{m,k} e^{j(2\pi/N)kf_0(t-mT)} g(t-mT) \quad (1)$$

其中: $N$  为子载波数, $a$  为每个子载波上的调制系数, $g(t)$  为矩形窗函数, $T$  为一个 OFDM 符号持续的时间长度, $f_0$  为载波间隔. 移动通信信号在定位检测方面具有一定的优势,带宽高,定位分辨率高,并且在信号方面具有较强的抗干扰性能以及较强的自相关性能. 因此,利用移动通信信号进行低空小目标的检测定位具有很强的优势.

当发射信号经过信道传输,接收机接收到的信号为

$$S_r(t) = S(t)h(t) \quad (2)$$

其中: $h(t)$ 为信号传输的信道, $S(t)$ 为发射信号.一方面,发射信号经过视距(LOS,line of sight)信道直接传输至接收机;另一方面,信号经过低空小目标反射至接收机.因此,移动通信检测系统的接收信号成分主要由直达波、多径信号及低空小目标的反射信号为主,收到的直达波信号和多径信号为

$$\sum_{k=0}^{K-1} a_k s_d(n-k), \text{ 散射目标回波信号为 } A_1 s_1(n), \text{ 令接收机主通道热噪声为 } v(n), \text{ 则移动通信检测系统的接收机接收到的信号采样为}$$

$$s_r(n) = \sum_{k=0}^{K-1} a_k s_d(n-k) + A_1 s_1(n) + v(n) \quad (3)$$

其中: $s_d(t)$ 为发射信号的采样, $K$ 为最大相消距离单元, $a_k$ 为接收通道中多径杂波第 $k$ 个距离单元的复幅度, $A_1$ 为目标回波信号的复幅度.

## 2 单通道模式下干扰重构与抑制算法

由第1节可知,移动通信系统只有一个主接收通道,而直达波信号及多径干扰信号的抑制需要算法了解这些干扰信号的特征及信息.因此,需要从移动通信检测系统下的接收通道中提取直达波信号及多径干扰信号,而不影响到低空小目标回波信号的检测,并完成直达波等干扰信号的抑制工作.

### 2.1 环境感知下的直达波干扰重构

由于直达波信号能量是LOS径信号,其能量是接收机接收信号中能量最强的信号,且目标回波经过低空小目标的反射,能量远低于直达波信号:

$$a_k \ll A_1, k=1,2,\dots,K \quad (4)$$

因此,直达波信号及多径信号会影响目标回波的检测.此外,目标回波能量远远低于噪声能量,回波信号会淹没于噪声信号中,无法被检测.

笔者利用在某一时刻OFDM符号下的信号处理,对当前时刻下OFDM符号的信道传输环境进行感知,而当前时刻的信号中,目标回波淹没在噪声功率中,环境感知的结果并不存在低空小目标的回波信号.通过接收机中对于信号传输的环境进行感知,并确定直达波、多径信号的到达时刻及信号能量,从而为直达波抑制过程中的参考信号提供样本.通过利用主接收通道的接收信号和本地序列,并结合OFDM的时频特性可知,在频域对OFDM符号的

传输环境进行感知估计会比时域环境下的感知更有准确性,因此,通过环境感知系统的频域最小二乘算法<sup>[13]</sup>,估计出信号的传输环境为

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{LS}} = (\mathbf{S}^H \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^H \mathbf{Y} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{Y} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{S} = \text{FFT}(s_d)$ ,表示发射信号的频域矩阵, $\mathbf{Y} = \text{FFT}(s_r)$ 表示为接收信号的频域矩阵. $\hat{\mathbf{H}}_{\text{LS}} = \text{FFT}(\hat{h})$ 表示为信号传输环境的频域信息,则可以获得当前信号的环境感知信息 $\hat{h}$ .

在获取到信号传输环境 $\hat{h}$ 后,由于淹没在噪声中目标回波的弱小及信号传输环境感知精度不足以感知目标回波,噪声的存在使得信号传输环境中的回波路径受到噪声的影响,从式(5)中信号传输环境 $\hat{h}$ 中即可获得传输环境的路径信息,即重构的直达波信号和多径信号的信号特性及信号时延.

$$h_{\text{dB}} = \max(\hat{h}) \quad (6)$$

$$h_{\text{delay}} = \underset{\hat{h}}{\text{index}}(h_{\text{dB}}) \quad (7)$$

其中: $h_{\text{dB}}$ 为从信号传输环境中获得直达波信号及多径信号的信号特征, $h_{\text{delay}}$ 为直达波信号及多径信号的信号时延.通过环境感知估计出来的信号传输环境重构直达波及多径干扰为

$$s'_{\text{ref}} = \hat{h} s_d \quad (8)$$

利用信号传输环境 $\hat{h}$ 所重构的参考信号,经过直达波抑制算法对移动通信检测系统所接收信号中的直达波干扰和多径信号进行抑制,提升回波的检测性能.

### 2.2 主接收通道中的直达波抑制算法

ECA算法是一种基于最小二乘(LS, least squares)估计直达波的消除方法,其基本思想是将主通道信号投影到一个由参考通道信号及其时延(直达波与静物多径干扰)张开的空间上,得到的投影向量再从主通道信号中扣除.算法将接收信号 $s_r$ 相对于重构后的参考信号 $s'_{\text{ref}}$ 进行线性建模,则LS估计中的目标函数为

$$\min_{\theta} \|s_r - \mathbf{X}\theta\| \quad (9)$$

其中: $\theta$ 为潜在杂波相对应的模型参数向量, $\mathbf{X}$ 为一个依赖于参考信号 $s_{\text{ref}}$ 的已知的矩阵, $\mathbf{X}$ 的列向量构成了 $M$ 维杂波子空间的基,从而通过估计获得并抑制主通道信号中的直达波信号和多径信号干扰.在ECA算法可以分段实施的思想,将接收信号和重构的直达波干扰信号按OFDM符号划分为不同处理单元,利用重构信号每个OFDM符号处理单元完成直达波干扰的投影矩阵,并通过该矩阵完成接收

通道中每个 OFDM 符号的干扰抑制。

将长度为  $N + K - 1$  的重构直达波信号  $s'_{\text{ref}}$  和长度为  $N$  的主通道信号按 OFDM 符号划分,如图 2 所示,每一个小格表示一个 OFDM 信号,OFDM 符号数为  $b$ 。传统抑制思想中,直达波信号相邻的块首尾有长度为  $K - 1$  的信号重叠,其中  $K$  为最大相消距离元。在移动通信系统下,以 OFDM 符号作为处理单元,因此  $K = 1$ ,每次对一个 OFDM 符号下的直达波信号及多径信号干扰进行抑制。主通道信号 OFDM 符号个数为  $N_b = N/b$ ,重构直达波信号 OFDM 符号个数为  $N_b$ ,并且为了便于构造杂波子空间  $X_i$ ,块数  $i = 0, 1, \dots, b - 1$ ,则接收通道信号下第  $i$  个 OFDM 符号可以表示为

$$s_r^i = [s_r(iN_b + 1) \quad \dots \quad s_r((i + 1)N_b + 1)]^T \quad (10)$$

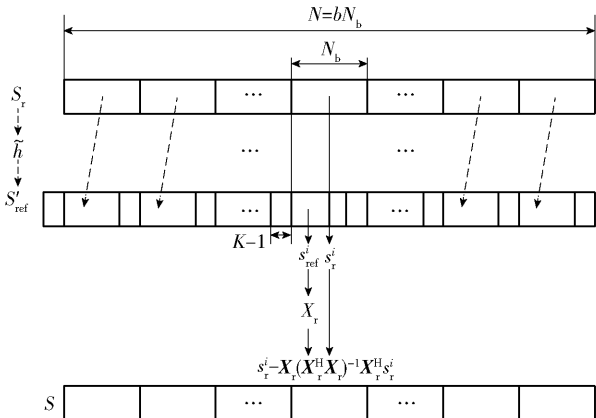


图 2 基于 OFDM 符号划分的直达波抑制算法原理

同理,重构直达波信号下第  $i$  个 OFDM 符号可以表示为

$$s'_{\text{ref}} = [s'_{\text{ref}}(iN_b + 1) \quad \dots \quad s'_{\text{ref}}((i + 1)N_b + 1)] \quad (11)$$

则利用式(11)的 OFDM 符号构建的杂波子空间为

$$X_i = B[s'_{\text{ref}}^{(i)}(n)] \quad (12)$$

$$B = \{b_{ij}\}_{i=1,2,\dots,N_b; j=1,2,\dots,N_b} \quad (13)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

矩阵  $B$  的作用是为了构造式(11)的对角矩阵,则回波在干扰子空间的正交投影为

$$s_p^i = X_i (X_i^H X_i)^{-1} X_i^H s_r^i, 0 \leq i \leq b - 1 \quad (15)$$

对重构直达波信号的第  $i$  个 OFDM 符号采用最小二乘算法进行处理,得到的输出为

$$s^i = s_r^i - s_p^i = P_{\text{ref}}^\perp s_r^i \quad (16)$$

其中正交补投影矩阵  $P_{\text{ref}}^\perp$  的表达式为

$$P_{\text{ref}}^\perp = I - X_i (X_i^H X_i)^{-1} X_i^H \quad (17)$$

最后,经过抑制算法处理后的全部信号可以表示为

$$s = \begin{bmatrix} s^0 \\ s^1 \\ \vdots \\ s^{b-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_r^0 - X_0 (X_0^H X_0)^{-1} X_0^H s_r^0 \\ s_r^1 - X_1 (X_1^H X_1)^{-1} X_1^H s_r^1 \\ \vdots \\ s_r^{b-1} - X_{b-1} (X_{b-1}^H X_{b-1})^{-1} X_{b-1}^H s_r^{b-1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

经过直达波抑制后的主接收通道信号中的直达波等干扰信号能量会被抑制,使得回波信号的能量强于干扰信号的能量,

$$a'_k \ll A_l, k = 1, 2, \dots, K \quad (19)$$

其中:  $a'_k$  为抑制后的干扰信号幅值,  $A_l$  为低空小目标回波信号的能量幅值。而基于 OFDM 符号划分的直达波抑制算法以 OFDM 符号为单位进行信号的干扰抑制处理。对每个 OFDM 符号的抑制结果进行信号处理后,对其进行信号能量积累。由于直达波的抑制与噪声的不相关性,那么  $N$  个符号后的回波信号的能量积累将强于噪声功率,信号的能量计算为

$$E[A_l N s_r(n)] > E[v(n)] \quad (20)$$

当回波信号处于可以检测的阶段时,利用直达波信号及回波信号的到达时刻差进行 TDOA 估计,完成低空小目标的检测定位。

### 2.3 算法可行性分析

基于 OFDM 符号划分的直达波抑制算法在每个符号下的计算仍然涉及  $(M \times M)$  维矩阵  $X^H X$  的求逆运算,其中,  $M$  的大小等于移动通信系统中一个 OFDM 符号的大小,那么接收信号的干扰抑制算法对应  $O(N_b M^2 + M^2 \ln M)$  次的复数乘积运算。然而,在每个移动通信数据帧中,算法针对移动通信信号每个 OFDM 符号分别进行并行处理,使得每个 OFDM 符号的扩展相消算法可同步进行。因此,通过硬件资源的有效利用,在完成一个 OFDM 符号下的干扰信号抑制时间能够完成所有数据帧下 OFDM 符号的干扰信号抑制,并减小存储单元,降低算法复杂度,在移动通信系统的接收模式下完成直达波的抑制工作。

## 3 实验结果与分析

以当前移动通信系统为平台,利用 OFDM 信号



作为检测信号,在  $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m} \times 500\text{ m}$  范围内对低空小目标进行目标检测,并通过目前常用的干扰抑制算法——自适应滤波算法<sup>[7]</sup>作为对比,干扰信号重构与抑制算法对主接收通道中直达波信号和多径信号进行抑制,仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数	
参数	数值
子载波数	1 024
符号调制阶数	4-QAM
信噪比/dB	0
信道功率/dB	[ -20 -23 -25 -29 ]
发射接收基站距离/m	1 000
信号积累帧数	10 000
目标大小/ $\text{cm}^3$	$45 \times 45 \times 10$
子载波间隔/kHz	15
信道时延/ms	[ 3. 4, 3. 8, 4. 3, 11. 7 ]

对经过直达波抑制后的主接收通道信号进行信号能量积累,获取目标回波信号峰值,系统估计信道如图 3 所示. 噪声及高强度直达波的存在导致回波信号淹没在直达波、多径干扰及噪声中,从图 3 可见,很难检测出回波信号.

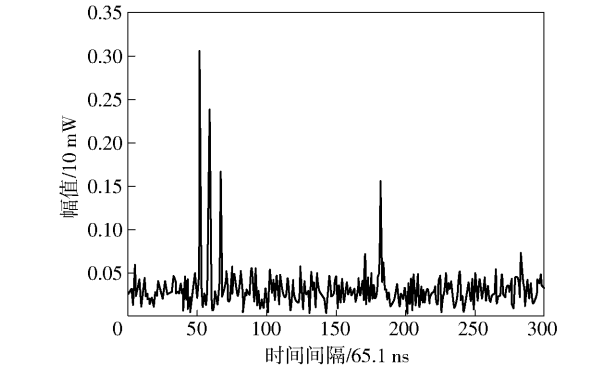


图 3 移动通信系统估计信道

由于传统自适应滤波器常用于现有被动目标检测系统干扰信号抑制过程,虽然传统算法在干扰信号抑制方面有收敛性能差等不足,但是其具有算法复杂度低、检测时延性能好等特点,经常被应用于目标检测系统. 提出的重构信号方法下的基于 OFDM 符号划分的抑制算法与自适应滤波算法下干扰信号抑制结果的对比如图 4 所示. 基于 OFDM 符号划分抑制算法的抑制性能强于自适应滤波器的抑制算法,并且能够抑制处于低空小目标回波到达时刻后的多径干扰信号. 由于自适应滤波器的权值收敛性能差,在单个 OFDM 符号的抑制信号累积结果来看,基于 OFDM 符号划分的抑制算法抑制后的回波峰值检测后的回波信号明显,且直达波能量抑制的

效果好.

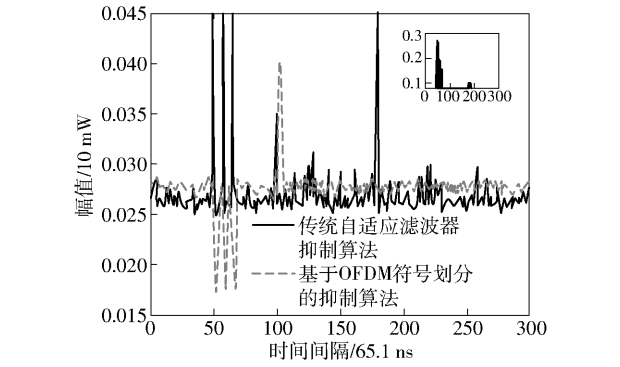


图 4 直达波抑制后的回波检测

通过图 3 和图 4 的对比可知,通过基于信道估计的直达波重构方法构造直达波信号及多径干扰信号,能够有效地完成主接收通道信号中的直达波信号及多径干扰信号的抑制.

在时延特性中对时间复杂度进行了仿真验证,如图 5 所示. 在没有并行处理单元的情况下,传统自适应滤波算法在信号处理时延性能方面要比新型干扰抑制算法的信号处理时延性能好,但是结合实际系统并行处理单元后,利用硬件资源可降低处理时延. 在 10 个并行处理单元下,新型算法能够有效地利用并行处理,在超过 13 个移动通信信号数据帧后,新型干扰抑制算法的时间复杂度比自适应滤波算法的时延要小,则检测系统可结合硬件资源降低干扰抑制算法的处理时间.

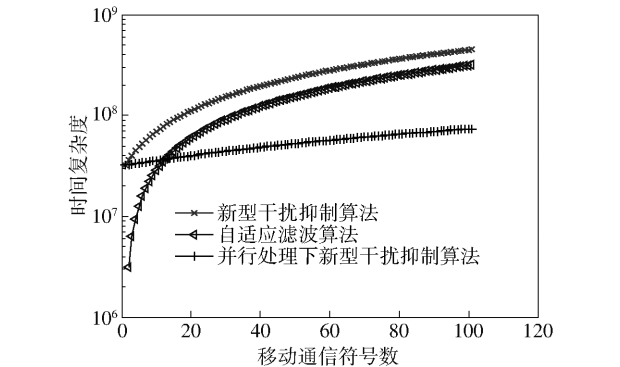


图 5 算法时延性能对比

图 6 中标记了发射端和接收端的位置,黑色采样点表示检测系统检测低空小目标的定位结果,根据多次检测结果进行定位追踪可以得到低空小目标的运动轨迹.  $T$  表示某个时间节点下的检测结果. 修改后的直达波抑制算法对于移动通信系统检测低空小目标的检测起关键作用,能够有效地完成直达波

和多径信号的干扰抑制。

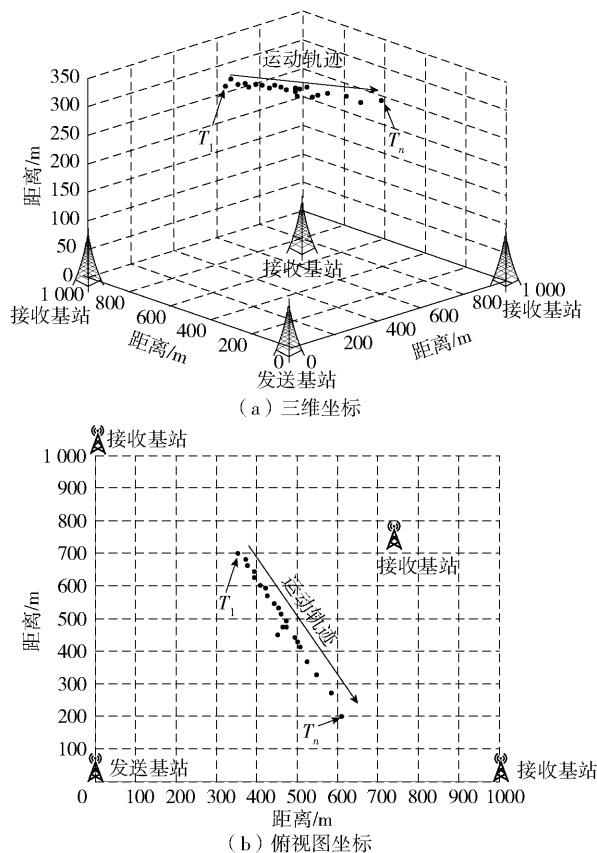


图6 系统检测低空小目标结果

## 4 结束语

在利用传统检测系统对低空小目标进行检测时,会受到高强度的直达波信号及多径信号的干扰,需要多通道从空间环境中接收并提取直达波信号,完成直达波抑制。利用移动通信系统对信号传输环境进行感知,并结合 OFDM 信号的时频特性,完成单通道下的直达波抑制工作,实现了单通道下移动通信系统对低空小目标的检测与追踪,为移动通信系统检测低空小目标提供了新的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 汪洋, 郝金双. 基于 CMMB 信号的稀疏无源探测算法[J]. 指挥信息系统与技术, 2016, 7(3): 25-31.  
Wang Yang, Hao Jinshuang. Sparse passive detection algorithm based on CMMB signal[J]. Command Information System and Technology, 2016(3): 25-31.
- [2] Feng W, Friedt J M, Cherniak G, et al. Direct path interference suppression for short-range passive bistatic synthetic aperture radar imaging based on atomic norm minimisation and Vandermonde decomposition[J]. IET Ra-

dar, Sonar & Navigation, 2019, 13(7): 1171-1179.

- [3] 柏如龙, 孙超, 张世川. IFF 信号单站无源定位技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8(3): 59-62.  
Bai Rulong, Sun Chao, Zhang Shichuan. Single observer passive location technology for IFF signals[J]. Command Information System and Technology, 2017, 8(3): 59-62.
- [4] Feng W, Friedt J M, Hu Z, et al. WiFi-based imaging for ground penetrating radar applications: fundamental study and experimental results[J]. The Journal of Engineering, 2019(20): 6364-6368.
- [5] 许道明, 张宏伟. 雷达低慢小目标检测技术综述[J]. 现代防御技术, 2018(1): 27.  
Xu Daoming, Zhang Hongwei. Overview of radar LSS target detection technology[J]. Modern Defense Technology, 2018(1): 27.
- [6] Silverio D, Kulpa J S, Barott W C. Off-grid endocloud target removal for passive radar[C]//2019 Signal Processing Symposium (SPS). Krakow: IEEE, 2019: 61-66.
- [7] Tang H, Wan X, Liu Y, et al. On the performance of multipath in reference signal for passive radar interference cancellation[C]//2017 IEEE Radar Conference (Radar-Conf). Seattle: IEEE, 2017: 1313-1316.
- [8] Attalah M A, Laroussi T, Gini F, et al. Range-Doppler fast block LMS algorithm for a DVB-T-based passive bistatic radar[J]. Signal, Image and Video Processing, 2019, 13(1): 27-34.
- [9] Colone F, Palmari C, Martelli T, et al. Sliding extensive cancellation algorithm for disturbance removal in passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(3): 1309-1326.
- [10] Fang L, Wan X, Yi J, et al. Modulation compensation of the batch version of the extensive cancellation algorithm for clutter mitigation in passive radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(1): 209-214.
- [11] Ansari F, Taban M R, Gazor S. A novel sequential algorithm for clutter and direct signal cancellation in passive bistatic radars[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2016(1): 134.
- [12] Palmari C, Martelli T, Colone F, et al. Disturbance removal in passive radar via sliding extensive cancellation algorithm (ECA-S)[C]//2015 IEEE Radar Conference. Washington DC: IEEE, 2015: 162-167.
- [13] Takano Y, Su H J. A low-complexity LS Turbo channel estimation technique for MU-MIMO systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(5): 710-714.