

一种多频外辐射源雷达信号相参处理方法

李 军, 刘红明, 何子述, 胡蜀徽, 王 擘, 李会勇

(电子科技大学电子工程学院, 四川成都 611731)

摘 要: 拓展照射源个数, 增加可利用的信号功率以改善系统的检测性能, 是外辐射源雷达的一个重要发展方向. 本文以调频广播外辐射源雷达为背景, 研究了基于多个电台信号的多频外辐射源雷达相参处理技术. 从信号模型出发, 推导了各匹配输出的表达式, 分析了各信号间的相位关系及影响信号相参合成的各种因素; 信号处理过程中进行相位补偿, 实现了多信号的相参合成; 最后对系统在距离分辨、杂波抑制、检测信噪比等方面获得的性能改善进行了讨论; 仿真结果验证了理论分析的正确性, 对进一步提升外辐射源雷达的系统性能具有重要的参考意义.

关键词: 外辐射源雷达; 多频信号; 相参合成; 调频广播

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2890-05

Coherent Processing Technique of Passive Radar Based on Multi-Frequency Signals

LI Jun, LIU Hong-ming, HE Zi-shu, HU Shu-hui, WANG Bo, LI Hui-yong

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: It is one of the development directions of passive radar to expand the number of illuminators and increase the available signal power to improve the system performance. Aimed at the FM broadcasting passive radar, this paper researched the coherent processing technique based on multi-frequency signals. Starting from signal model, it deduced the expression of each matching-filter output, and analyzed the phase relationship of each signal and various factors infecting coherent integration of multi-signals. The differentia phase item of each signal was compensated during signal processing to realize coherent integration. At last, the performance improvements of range distinguishing, clutter restraint and detection SNR were discussed. Simulation results proved the valid of the theory analysis, and it was important to improve the system performance of passive radar.

Key words: passive radar; multi-frequency signals; coherent integration; FM broadcasting

1 引言

外辐射源雷达(又称无源雷达)利用广播、电视或无线通信信号等作为照射源来探测目标,具有良好的反隐身、反侦察和抗打击能力,受到了广泛关注和深入研究^[1-6]. 现有外辐射源雷达系统多采用单照射源信号,可利用的信号功率有限,作用距离、定位精度和检测性能等均受到限制. 为此,拓展照射源种类和个数,增加系统可利用的信号功率,成为外辐射源雷达的一个重要发展方向,不少文献作了此方面的研究. 文献[7]提出利用多个 GSM 发射站的信号来提高目标参数估计精度,文献[8]利用多个 FM 电台信号来改善距离分辨力,文献[9]建立了基于多频 FM 信号的外辐射源雷达实验系统,利用多信号非相参合成改善目标检测的稳健性,文献[10]将 MIMO 技术应用到外辐射源雷达中,分析了其在监视、跟踪范围方面的优势,文献[11]则提出了基于 FM 广播的 MIMO 雷达,利用空间分集克服目标 RCS 起伏. 这些研究利用多个照射源的信号来改善外辐射源雷

达的性能,但大多采用了数据融合或非相参合成的处理方式,相比相参合成处理,信噪比会有一定损失.

本文以应用最为广泛的广播/电视信号外辐射源雷达为背景,研究了基于多个 FM 电台信号的多频外辐射源雷达相参处理技术,提出了实现多信号相参合成的原理和方法,分析了其相对于传统单频外辐射源雷达在检测性能上获得的巨大改善.

2 系统原理及信号模型

基于多个 FM 电台信号的多频外辐射源雷达(如图 1 所示)利用同一发射站发射的多个不同频道的广播信号进行目标探测. 与常规外辐射源雷达^[3]类似,接收天线收到的信号既包括目标回波和大量杂波,还包括功率很强的直达波信号. 接收端对接收信号混频、采样,并经频道分离、杂波抑制等处理后,进行二维滑动相关(即匹配滤波),提取目标距离、速度等信息. 在进行目标检测之前,对各通道信号进行相位补偿与相参合成,以最大程度的改善检测信噪比.

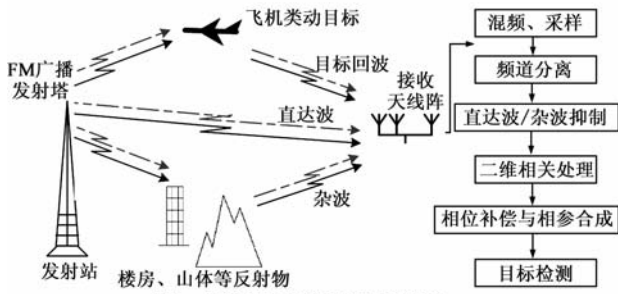


图1 多频外辐射源雷达示意图

设发射站分别采用 N 根天线发射 N 个 FM 电台的信号,如图 2 所示, d_{i1} 为第 i ($i = 1 \sim N$) 个天线相对于第 1 个天线的间距,且 $d_{11} = 0$, θ_{tgt} 为远场目标相对于发射天线阵的仰角。

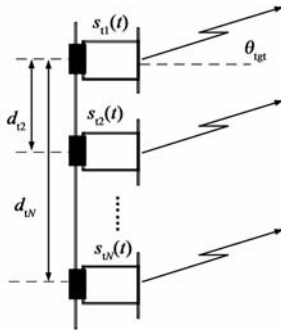


图2 多个FM电台的发射天线示意图

第 i 个电台的发射信号可表示为:

$$s_{ti}(t) = a_i(t)e^{j2\pi f_i t} e^{j\varphi_{0i}} \quad (1)$$

其中, f_i 为载波频率, φ_{0i} 为发射初相; $a(t) = \sqrt{P_i} e^{j\int_0^t v_i(\xi) d\xi}$ 为调频信号复包络, $v_i(t)$ 为调制信号, k_f 为调频灵敏度, P_i 为发射功率. 各信号间的相位关系是我们关注的重点,为简化分析,下面的推导中令 $P_i = 1$, 并忽略传播损耗。

由于发射天线间存在空间相位差,目标处收到的信号可表示为:

$$s_{tgt}(t) = \sum_{i=1}^N s_{ti}(t - \tau_{tgt}) \cdot e^{-j\phi_{di}} \quad (2)$$

其中, $\tau_{tgt} = R_T/c$ 为目标相对于发射站的距离延时, $\phi_{di} = 2\pi f_i d_{i1} \sin\theta_{tgt}/c$ 为发射通道间的空间相位差,它是发射信号载频 f_i 、天线间距 d_{i1} 和目标角度 θ_{tgt} 的函数。

对于点源目标,信号经其反射后到达接收天线,接收到的回波信号为:

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^N s_{ri}(t) e^{-j\phi_{di}} \quad (3)$$

其中,

$$s_{ri}(t) = \sigma_i e^{j\varphi_{\beta i}} s_{ti}(t - \tau) e^{j2\pi f_{di}(t - \tau)} \quad (4)$$

为第 i 个电台信号的回波分量. $\tau = (R_T + R_R)/c$ 为双程距离延时; $f_{di} = 2f_i v_r/c$ 为目标的多普勒频移; σ_i 为目标对第 i 个信号的反射系数, $\varphi_{\beta i}$ 为目标对第 i 个信号引入的附加相位. 在调频广播信号所涉及频带范围内(88 ~ 108MHz),由于载频差异不大,可以认为目标反射时,对各个信号引入的附加相位近似相等,即 $\varphi_{\beta i} \approx \varphi_{\beta}$.

综合式(1)和式(4),式(3)可表示为:

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i e^{j\varphi_{\beta i}} a_i(t - \tau) e^{j2\pi(f_i + f_{di})(t - \tau)} e^{j\varphi_{0i}} e^{-j\varphi_{di}} \quad (5)$$

同理, N 个电台的直达波信号到达接收天线,可表示为:

$$s_{rd}(t) = \sum_{i=1}^N s_{ti}(t - \tau_d) e^{-j\varphi_{di}} \\ = \sum_{i=1}^N a_i(t - \tau_d) e^{j2\pi f_i(t - \tau_d)} e^{j\varphi_{0i}} e^{-j\varphi_{di}} \quad (6)$$

其中, τ_d 为信号由发射塔传输到接收站的时间延迟,设发射塔到接收天线的距离为 R_d ,则 $\tau_d = R_d/c$; $\varphi_{di} = 2\pi f_i d_{i1} \sin\theta_d/c$ 为直达波信号间的发射天线空间相位差, θ_d 为接收天线相对于发射天线阵的俯仰角。

对接收到的目标回波信号进行混频分离后,得到 N 个基带信号 ($i = 1, 2, \dots, N$):

$$u_i(t) = s_{ri}(t) e^{-j\phi_{di}} \cdot e^{-j2\pi f_i t} \cdot e^{j\varphi_{\beta i}} \\ = \sigma_i e^{j\varphi_{\beta i}} a_i(t - \tau) e^{j2\pi f_{di} t} e^{-j2\pi(f_i + f_{di})\tau} e^{j\varphi_{0i}} e^{-j\varphi_{di}} \cdot e^{j\varphi_{\beta i}} \quad (7)$$

其中, $e^{j\varphi_{\beta i}}$ 为混频等处理可能引入的附加相位项(通道不一致性)。

类似的,也可对直达波信号进行混频分离,得到 N 个基带信号:

$$u_{di}(t) = s_{rdi}(t) e^{-j\phi_{di}} \cdot e^{-j2\pi f_i t} \cdot e^{j\varphi_{\beta di}} \\ = a_i(t - \tau_d) e^{-j2\pi f_{di} t} e^{j\varphi_{0i}} e^{-j\varphi_{di}} \cdot e^{j\varphi_{\beta di}} \quad (8)$$

其中, $e^{j\varphi_{\beta di}}$ 为混频等处理可能引入的附加相位项。

将直达波与回波信号进行二维滑动相关处理(匹配滤波)后,得到输出:

$$x_i(\tau', \zeta_i) = \int_0^{T_F} u_i(t) u_{di}^*(t - \tau') e^{-j2\pi \zeta_i t} dt \quad (9)$$

其中, T_F 为相关处理间隔(积累时间)。

当 $\tau' = \tau - \tau_d$, $\zeta_i = f_{di}$ 时, $|x_i(\tau', \zeta_i)|$ 达到最大值,此时有

$$x_i(\tau - \tau_d, f_{di}) = \sigma_i e^{j\varphi_{\beta i}} A_i e^{-j2\pi[(f_i + f_{di})\tau - f_{di}\tau_d]} e^{-j(\phi_{di} - \phi_{di})} \cdot e^{j(\varphi_{\beta i} - \varphi_{\beta di})} \quad (10)$$

A_i 为匹配滤波后的输出幅度,其大小与积累时间和复包络 $a_i(t)$ 有关。

3 相参合成原理

由式(10)可以看出,匹配滤波以后,各通道输出信号间存在不同的相位项,它是影响各信号相参合成的关键因素,将其表示为:

$$\epsilon_i = e^{-j2\pi((f_i + f_{di})\tau - f_{di}\tau_d)} e^{-j(\phi_{di} - \phi_{di})} e^{j(\varphi_{\beta i} - \varphi_{\beta di})} \quad (11)$$

记 ϵ_i 中的各项分别为

$$\epsilon_{i1} = e^{-j2\pi((f_i + f_{di})\tau - f_{di}\tau_d)} = e^{-j2\pi(f_i + f_{di})\tau} e^{j2\pi f_{di}\tau_d} \quad (12)$$

$$\epsilon_{i2} = e^{-j(\phi_{di} - \phi_{di})} \quad (13)$$

$$\epsilon_{i3} = e^{j(\varphi_{\beta i} - \varphi_{\beta di})} \quad (14)$$

其中, ϵ_{i2} 是由发射天线空间相位差导致的相位项,在已知发射阵列几何结构和坐标位置的条件下,可以直接进行补偿. ϵ_{i3} 是由接收端混频等处理可能引入的附加相位项,当各信号通道附加相位不一致时,可采用通道校正的方法进行补偿. 而 ϵ_{i1} 是因各电台载频不一致并由目标距离延迟导致的相位项,它是影响信号相参合成最核心的因素,必须进行有效的补偿.

$$\text{记 } f_i = f_1 + \Delta f_i \quad (15)$$

其中, Δf_i 为第 i 个电台相对于第 1 个电台的频率间隔,且 $\Delta f_1 = 0$. 并令 $\Delta f_{di} = \Delta f_i \cdot \frac{2v}{c}$, 它是由信号频差决定的多普勒频率差, 于是有

$$\epsilon_{i1} = e^{-j2\pi(f_1 + f_{d1})\tau} e^{-j2\pi(\Delta f_i + \Delta f_{di})\tau} e^{j2\pi f_i \tau_d} \quad (16)$$

其中, $e^{j2\pi f_i \tau_d}$ 是直达波传输延迟相位项,由于收发站距离 R_d 可事先获得,故该项为确定值并可直接计算得到; $e^{-j2\pi(f_1 + f_{d1})\tau}$ 是每个频道匹配输出后均包含的公共相位项,它不会影响相参合成,进行相位补偿时不用考虑;而 $e^{-j2\pi(\Delta f_i + \Delta f_{di})\tau}$ 是因频差并由目标距离延迟导致的相位项,它既是各信号频差 Δf_i 的函数,又是目标距离延迟 τ 的函数,补偿时,应根据不同的通道、按不同的检测单元进行.

对各匹配输出进行有效的相位补偿后,即可实现多信号的相参合成,合成后输出可表示为:

$$\begin{aligned} & y(\tau - \tau_d, f_{di}) \\ &= \sum_{i=1}^N [x_i(\tau - \tau_d, f_{di}) \cdot \epsilon_{i2}^{-1} \cdot \epsilon_{i3}^{-1} \cdot e^{-j2\pi f_i \tau_d} \cdot e^{j2\pi(\Delta f_i + \Delta f_{di})\tau}] \\ &= e^{j\varphi_0} e^{-j2\pi(f_1 + f_{d1})\tau} \sum_{i=1}^N \sigma_i A_i \end{aligned} \quad (17)$$

取模后,得

$$|y(\tau - \tau_d, f_{di})| = \left| \sum_{i=1}^N \sigma_i A_i \right| = \sum_{i=1}^N |\sigma_i A_i| \quad (18)$$

由此可见,多信号相参合成后,输出信号的幅度可得到 N 倍的改善. 在发射功率相同的情况下,输出信噪比近似可改善 $10\log NdB$.

4 信号处理

接收信号处理流程如图 1 右半部分所示. 首先是对各个调频基带信号的分离和提取,可直接对接收信号进行射频采样(射频信号带宽 20MHz),并经数字下变频、低通滤波、抗混叠滤波和抽取等处理后得到各调频基带信号(带宽 < 200kHz). 对于阵列接收天线,通常可采用数字波束形成(DBF)技术进行空域滤波,形成多个接收波束;为降低运算量,接收 DBF 处理可在频道分离后对各个基带信号分别进行. 接下来的直达波对消和杂波抑制处理也按不同的频道分别进行. 之后,利用辅助通道接收的直达波信号与主通道处理得到的目标回

波信号进行二维滑动相关处理,提取目标的距离和多普勒信息.

滑动相关处理既可按式(9)所对应的时域方法进行,也可按频域快速处理算法进行^[1,12]. 值得注意的是,为实现同一目标的相参合成,每个频道相关处理输出所对应的距离和速度单元必须一致,但由于载频差异,同一目标的回波具有不同的多普勒频率,因此,各频道在进行滑动相关处理时,所采用的多普勒滑动间隔 $\Delta\zeta_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$)将有所不同. 若以第 1 个频道为参考,有:

$$\Delta\zeta_i = \frac{f_i}{f_1} \cdot \Delta\zeta_1 \quad (19)$$

二维相关处理后,得到 N 个二维矩阵,矩阵的每个元素对应一个“距离-速度”检测单元. 为实现各频道输出的相参合成,必须对上一节提到的差异相位项 ϵ_i 进行补偿. 其中, ϵ_{i2} 根据发射天线的空间相位关系按频道进行补偿(等效发射波束形成), ϵ_{i3} 根据测量得到的接收通道不一致性误差进行补偿, ϵ_{i1} 中的 $e^{j2\pi f_i \tau_d}$ 项根据收发站距离直接补偿, ϵ_{i1} 中的 $e^{-j2\pi(\Delta f_i + \Delta f_{di})\tau}$ 项需按频道根据不同的检测单元进行补偿. 具体实现时,可事先算出各频道所有应补偿的量,存储为一补偿矩阵,再对各频道二维相关处理输出采用矩阵点乘的方式进行相位补偿.

进行相位补偿后,即可实现 N 路信号的相参合成. 为获得多频信号带来的宽带效果,相参合成处理过程中,还应按宽带分辨率在各样点间进行插值. 最后,将合成输出送检测处理器进行检测判决.

上述处理过程中,运算速度及实时性是具体实现时必须关注的问题. 补偿矩阵的计算由于可按检测单元事先进行,因此不会占用实时运算量. 另一方面,各信号通道的处理是在窄带上进行的,匹配滤波后的相位补偿处理运算量也不会太大. 相对而言,各频道的二维相关处理的运算量较大,对计算速度的要求较高. 但由于相关处理可在频域上进行,并可借助于“图形处理器(GPU)”等来实现高速并行运算,因此,在运算速度上是能够满足实时性要求的. 同时,其它相位补偿及相参合成过程中的并行处理也都可交由 GPU 来完成,这样整个信号处理的计算实时性问题可以得到显著缓解.

5 性能分析及仿真验证

5.1 距离分辨能力

雷达距离分辨力取决于信号带宽,单个 FM 电台的信号带宽 $B_s \leq 200\text{kHz}$, 对应的距离分辨力为 $\Delta r_{cs} = c / (2B_s) \leq 750\text{m}$; 利用多个电台信号后,系统总带宽 B_Σ 拓展为所有电台分布的频率范围,它约等于最大载频与最小载频之差,即 $B_\Sigma \approx \max(f_i) - \min(f_i)$, 对应的距离分辨力可达 $\Delta r_{cs} = c / (2B_\Sigma)$.

5.2 杂波抑制能力

多个电台的信号往往由垂直排列的多根天线发射,这些天线可看作一垂直线阵(如图 2 所示),各信号在不同俯仰角上将产生不同的空间相位差,由此系统具备了一定的空域分选能力.接收端相参合成处理时,需对目标所在俯仰方向上的空间相位差进行补偿,这相当于是在接收端进行等效的发射波束形成,于是,可在一定程度上抑制与目标不同俯仰角上的杂波.杂波抑制能力与电台个数、发射天线阵口径、目标/杂波仰角差有关.

5.3 检测性能

由第三节分析可知, N 个电台信号相参合成处理后,相比单个电台的输出,最大可获得 $10\log N$ dB 的信噪比改善,因此,检测性能将显著提高.图 4、图 5 分别给出了单个频道的处理输出和 8 个频道相参合成处理输出.仿真采用的 FM 信号载频 f_i 在 88 ~ 108MHz 范围内随机产生,调制信号为任意音频信号,已调信号带宽 100kHz,设各电台发射功率相同;目标与发射站的距离 R_T 为 80km,与接收站的距离 R_R 为 160km,速度 v_r 为 120m/s;发射站与接收站的距离 R_d 为 100km;有效积累时间 T_F 为 0.2s.

表 1 给出了几种情况下处理输出的信噪比.可以看出,8 个电台处理输出相参合成后,相比单个电台的情况,信噪比平均可改善 6 ~ 8dB,接近理论值 $10\log N = 9$ dB,不到 9dB 是由于目标的非点源效应及其它非理想因素的影响(仿真中均已考虑).

图 6 给出了单个频道处理输出、8 个及 16 个频道相参合成输出进行 CA-CFAR 检测的检测概率曲线(虚警概率 10^{-6}).以单个频道信噪比为 10dB 的标准衡量,单个频道处理输出的检测概率为 31%,相参合成后可达 87% 和 93%.可见,检测性能大为改善.

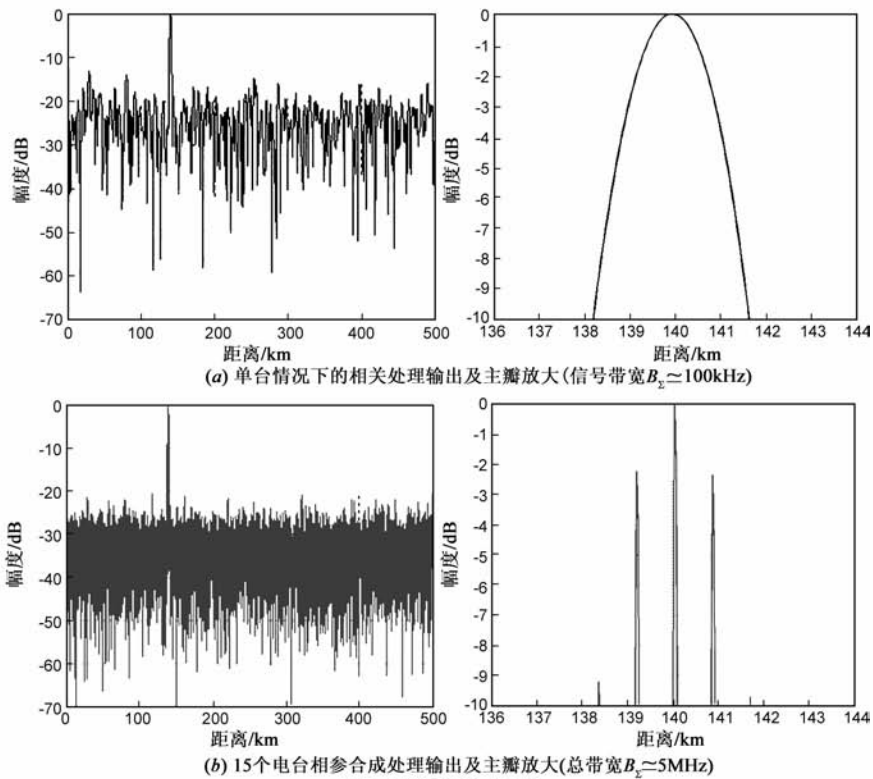


图3 距离分辨力对比

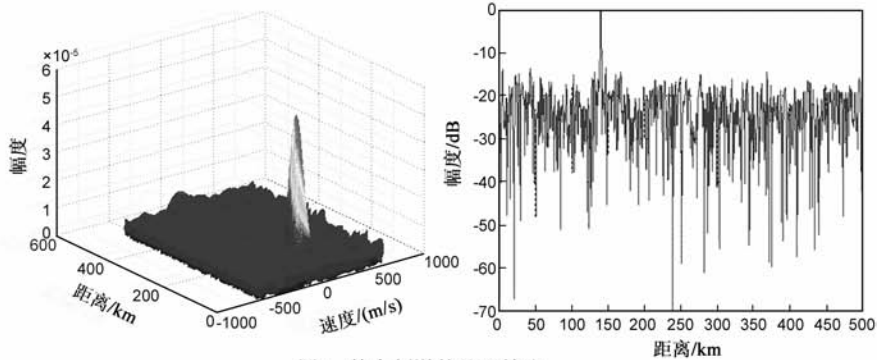


图4 单个频道的处理输出

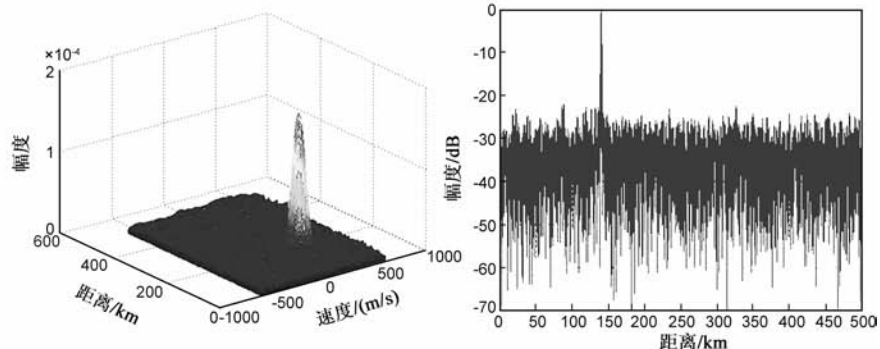


图5 8个频道相参合成处理输出

表 1 各频道处理输出信噪比及相参合成输出信噪比(单位: dB)

频道 1	频道 2	频道 3	频道 4	频道 5	频道 6	频道 7	频道 8	相参合成
22.1078	21.7230	19.8209	21.7287	20.7789	20.6147	22.5243	21.8950	28.6619

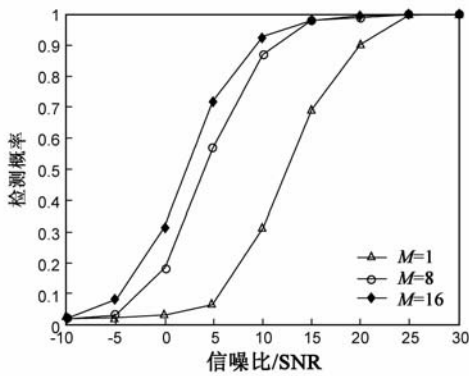


图6 不同频道数下的检测概率

6 结束语

基于多个照射源的外辐射源雷达具有显著的性能优势和巨大的技术潜力. 本文以 FM 广播外辐射源雷达为背景, 研究了基于多个电台信号的多频外辐射源雷达相参处理技术, 通过补偿各信号间的差异相位项, 实现多信号输出的相参合成, 可获得系统性能的显著提升, 除能有效改善目标检测信噪比外, 还可在一定程度上改善距离分辨力和杂波抑制能力等. 这对于进一步提升现有外辐射源雷达的战术性能、增强系统作战能力具有重要的参考意义. 仿真结果验证了理论分析的正确性, 但实际效能还有待实测数据的进一步验证.

本文的研究虽只针对基于 FM 广播信号的外辐射源雷达, 但可推广到基于其它信号形式的外辐射源雷达, 只要是单站多台模式, 即同一发射站发射多个频道信号的情况均适用.

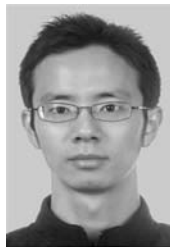
参考文献

- [1] Zoeller C L, Budge M C, Moody M J. Passive coherent location radar demonstration [A]. Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory[C]. Huntsville, Alabama: IEEE Press, 2002. 358 - 362.
- [2] 杨运甫, 陶然, 等. 一种 GSM 无源雷达信号模型及模糊函数性质研究[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1048 - 1052.
YANG Yun-fu, TAO Ran, et al. A Model of GSM based passive radar signal and ambiguity function features[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1048 - 1052. (in Chinese)
- [3] Howland P E, Maksimiuk D, Reitsma G. FM radio based bistatic radar[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 107 - 115.
- [4] 王大海, 王俊. 单发多收模式下无源雷达成像研究[J]. 电子学报, 2006, 34(6): 1138 - 1141.
WANG Da-hai, WANG Jun. Research of passive radar imaging using single external illuminator and multiple receivers[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1138 - 1141. (in Chinese)
- [5] Poullin D, Flecheux M. Recent progress in passive coherent lo-

cation (PCL) concepts and technique in France using DAB or FM broadcasters [A]. 2008 IEEE Radar Conference [C]. Rome: IEEE Press, 2008. 1 - 5.

- [6] 宋杰, 何友, 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, et al. Overview of passive radar technology based on noncooperative radar illuminator[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2151 - 2156. (in Chinese)
- [7] Mendi U M D, Sarkar B K. Passive radar using multiple GSM transmitting stations [A]. Radar Symposium, 2006, IRS [C]. Krakow, Poland: IEEE Press, 2006. 1 - 4.
- [8] Tasdelen A S, Koymen H. Range resolution improvement in passive coherent location radar systems using multiple FM radio channels[A]. Proceedings of the Institution of Engineering and Technology Forum on Waveform Diversity and Design in Communications, Radar and Sonar [C]. London: IET Press, 2006. 23 - 31.
- [9] Bongioanni C, Colone F, Lombardo P. Performance analysis of a multi-frequency FM based passive bistatic radar [A]. 2008 IEEE Radar Conference [C]. Rome: IEEE Press, 2008. 1 - 6.
- [10] Kulpa K, Malanowski M. The concept of simple MIMO PCL radar [A]. Radar Conference, European, 2008 [C]. Amsterdam, Netherlands: IEEE Press, 2008. 240 - 243.
- [11] 万红, 李申堂, 冯向荣, 等. 基于 FM 广播的 MIMO 无源雷达性能分析[J]. 现代雷达, 2008, 30(3): 30 - 33.
WAN Hong, LI Shen-tang, FENG Xiang-rong, et al. Performance analysis of MIMO passive radar based on FM broadcast [J]. Modern Radar, 2008, 30(3): 30 - 33. (in Chinese)
- [12] 高志文, 陶然, 单涛. 外辐射源雷达互模糊函数的两种快速算法[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 669 - 672.
GAO Zhi-wen, TAO Ran, SHAN Tao. Two fast algorithms of cross-ambiguity function for passive radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(3): 669 - 672. (in Chinese)

作者简介



李 军 男, 1977 年生于四川达县, 电子科技大学电子工程学院讲师. 主要研究方向为雷达信号处理、自适应阵列技术等.

E-mail: lijun_sc@126.com

刘红明 男, 1967 年生于江苏靖江, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理. E-mail: kjlhm@163.com

何子述 男, 1962 年生于四川新繁, 现为电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师. 目前主要从事相控阵技术、宽带 MIMO 数字阵列雷达技术的研究. E-mail: zshe@uestc.edu.cn