

单频网分布式外辐射源雷达技术

万显荣* 易建新 程丰 饶云华 龚子平 柯亨玉
(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: 外辐射源雷达的研究和应用正朝着由单收发对向多收发对体制发展。作为该型雷达的一种重要机会照射源,新一代数字广播电视广泛采用单频(或同频)网覆盖方式,其内在决定了基于此的外辐射源雷达是分布式和网络化的。鉴于照射源单频网配置下外辐射源雷达不同寻常的工作和处理方式,该文归纳提出了单频网分布式外辐射源雷达的概念,阐述了该型雷达的主要特性以及所面临的核心问题,并就部分关键技术讨论了若干可供尝试的解决方案,结合原理实验结果展示了该型雷达的可行性,最后提出了集外辐射源雷达探测网的四网融合的概念并展望了其应用前景。

关键词: 外辐射源雷达; 分布式雷达; 单频网; 数字广播电视; 四网融合

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)06-0623-09

DOI: 10.12000/JR14156

Single Frequency Network Based Distributed Passive Radar Technology

Wan Xian-rong Yi Jian-xin Cheng Feng Rao Yun-hua Gong Zi-ping Ke Heng-yu
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The research and application of passive radar are heading from single transmitter-receiver pair to multiple transmitter-receiver pairs. As an important class of the illuminators of opportunity, most of modern digital broadcasting and television systems work on Single Frequency Network (SFN), which intrinsically determines that the passive radar based on such illuminators must be distributed and networked. In consideration of the remarkable working and processing mode of passive radar under SFN configuration, this paper proposes the concept of SFN-based Distributed Passive Radar (SDPR). The main characteristics and key problems of SDPR are first described. Then several potential solutions are discussed for part of the key technologies. The feasibility of SDPR is demonstrated by preliminary experimental results. Finally, the concept of four network convergence that includes the broadcast based passive radar network is conceived, and its application prospects are discussed.

Key words: Passive radar; Distributed radar; Single Frequency Network (SFN); Digital broadcasting and television; Four network convergence

1 引言

外辐射源雷达(又称无源雷达)是一种既古老又新兴的雷达体制,其核心特点是无需自配发射源,而是间接利用第三方发射的电磁信号探测目标,具有低成本、隐蔽性好、抗干扰能力强、电磁兼容性好等诸多优势。外辐射源雷达致力于摆脱发射源的束缚,使其能够利用大量现存的照射源实现目标探测,打破了军用和民用之间的界线,集中体现了军民融合的精神内涵。事实上,现今外辐射源雷达的

研究热点即为利用民用商业广播电视、通讯信号等为探测服务^[1-5]。

系统体制上,目前较为成熟的外辐射源雷达系统主要是基于单发单收的双基地几何架构,但双基地架构存在着分辨率强烈依赖于几何位置以及目标散射截面受目标姿态影响大等问题,从而导致该几何架构在探测稳定性和跟踪连续性上表现出不^[6]。为提高目标检测概率和探测稳定性,研究可从两个方面着手,一是融合多波段/多频道探测信息,二是考虑采用多发多收(或多发射接收对)的分布式探测体制。当然,上述两者可以兼容,比如可在分布式探测系统上进一步考虑融合多波段/多频道探测信息。

分布式外辐射源探测的系统架构与所采用的照

2014-12-10 收到, 2014-12-17 改回; 2014-12-22 网络优先出版
国家自然科学基金(61331012, 61371197, U1333106, 61271400)和
中央高校基本科研业务费专项资金(2014212020201)资助课题

*通信作者: 万显荣 xrwan@whu.edu.cn

射源密切相关,根据国家战略规划,一种快速发展的新兴照射源——单频(又称同频)覆盖网值得关注。所谓单频网是指网中若干发射点同时在一频率发射相同信号,依托先进的调制解调技术防止站间互扰从而实现对一定服务区域的可靠覆盖。单频网是一种频率和功率节约型的组网技术,可缓解频谱资源日益紧张的局势,在新一代数字广播电视中被广泛采用,如中国 CMMB/DTMB/CDR 均采用单频网覆盖技术。单频网也在国际市场上获得广泛应用,欧洲 DAB/DVB-T 采用单频网技术,日本 ISDB-T 也支持单频网技术。综合考虑到功率水平、电波覆盖、信号波形等因素,数字广播电视单频覆盖网非常适合用作外辐射源雷达的机会照射源。

然而,研究发现基于单频网的外辐射源雷达具有显著不同于常规外辐射源雷达的特征,为此本文提出单频网分布式外辐射源雷达的概念(SFN-based Distributed Passive Radar, SDPR),详细阐述 SDPR 这一概念的内涵及核心问题,针对新问题讨论其需要解决的关键技术,通过部分理论分析和现场试验论证该体制雷达的可行性。

2 单频网与分布式探测

外辐射源雷达是依赖于外部辐射源而构筑的非合作式双/多基地雷达系统,外部辐射源的特性决定了该型雷达的整体构架和后续处理方案。从某种意义上可以说,机会照射源的发展历程也表征了外辐射源雷达的研究历程。早期的广播电视均采用模拟照射源,各发射站通过频率区分而避免互扰,故称之为多频网覆盖体制。多频网中,为了实现对一定区域的有效覆盖,频率和功率资源是一对矛盾体。而与多频网相对的单频网技术则有效调和了这一对矛盾,通过在预期覆盖面积内布置多个同频段工作的同源发射机(同时发射相同信号),利用信道估计均衡多径的互扰,单频网可同时节约频率和功率资源,这一关键优势促使其为新一代数字广播电视广泛采用。

在探测系统架构上,基于单频网照射源的外辐射源雷达系统具有不同于常规多频网外辐射源雷达的显著特征,主要因各站发射相同信号(同时同频同内容)所导致。该特征可通过下述模型进行阐述,设单频网中含 P 个同源发射站,各站所发射的基带信号为 $d(t)$,将地物多径杂波建模为一系列点散射体的贡献,那么接收端的基带信号可表示为:

$$s(t) = \sum_{p=1}^P A_p d(t - t_p) + \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^{N_c} c_{p,n} d(t - \tau_{p,n}^c) + \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^{N_t} \alpha_{p,m} d(t - \tau_{p,m}) \exp(j2\pi f_{p,m}^D t) + w(t) \quad (1)$$

其中第 1 项为各发射站的直达波,第 2 项表征地物多径杂波,第 3 项为目标回波分量,最后一项为噪声。式(1)模型中,虽然各发射站引起的回波成分均用下标加以区分,但实际上由于各站信号相同,在接收端无法直接判别某回波源自何发射站的贡献。这一点与多频网外辐射源雷达显著不同,多频网中各发射站发射信号可区分,在接收端可直接判断某信号成分的来源。

进一步从量测域描述这一特征。暂时先考虑目标回波分量,经 2 维(时延-多普勒)相关处理后检测得到目标量测记为 $z^{(m)}$, $m = 1, 2, \dots, M$, 单纯就某一量测而言,其与目标状态 \mathbf{x} 的关系须用下述模型刻画

$$z^{(m)} = \begin{cases} \mathbf{h}_1(\mathbf{x}) + \mathbf{w}_1, & \text{Tx}_1\text{-Rx} \\ \mathbf{h}_2(\mathbf{x}) + \mathbf{w}_2, & \text{Tx}_2\text{-Rx} \\ \vdots \\ \mathbf{h}_P(\mathbf{x}) + \mathbf{w}_P, & \text{Tx}_N\text{-Rx} \\ \tilde{z}, & \text{虚警} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{h}_n(\mathbf{x})$, $n = 1, 2, \dots, P$ 是与发射站 n 对应的量测方程; \mathbf{w}_n 为量测噪声。可见,在单频网情况下,我们不能直接说某个量测源自某发射站,因为量测与发射站的对应关系并非先验已知。换言之,任一量测均与整个单频网有关。虽然在多频网情况下,可能只选用一个发射站就可以有效提取目标信息,但这在单频网中却行不通,因为即便人为摒弃其中 $P-1$ 个发射站,所有发射站产生的量测却依然存在,把这些量测均赋予一个发射站将得到远超目标的航迹(包括目标真实航迹和其他站产生的多径航迹)。真实航迹与多径航迹无法区分,故跟踪的航迹也只能判别目标的有无而无法获取目标的状态。所以,单频网情况下,多站信息的综合利用,也即分布式和网络化探测是一种必然选择,而不像多频网情况下那样是一种可选模式。这是单频网与分布式之间的辩证关系,也是 SDPR 的理论出发点。为此可构建如图 1 所示的 SDPR 系统。

SDPR 除具有外辐射源雷达的一般优点外,还综合了单频网和分布式探测各自的优点。主要体现在:

(1) (某种意义上的)系统简化。单频网结构下,布置一个接收站即可构成多发一收(MISO)的双/多基地雷达,布置多个接收站即可构成多发多收(MIMO)雷达,且接收机只需工作于一个频带,故接收系统相对于多频网情况得到简化。

(2) 多角度目标信息。单频网中各个发射站照射目标的角度不同,在量测级上综合多角度信息可

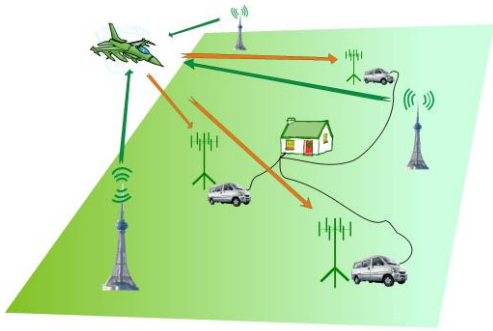


图 1 SDPR 探测系统示意图

Fig. 1 Diagram of SDPR system

实现空间分集, 提高定位性能, 在信号级上融合多角度信息可聚焦信号, 提高检测概率甚至用于目标分类识别。

(3) 机动性强。强机动性是分布式探测的固有优势, 此外, 由于单频网照射源分布广泛, 只需布置接收系统, 利用当地照射源即可构建 SDPR, 因此结合外辐射源和单频网进一步提高了机动性。

3 核心问题与关键技术

SDPR 在享有诸多优势的同时, 也因单频网的引入带来一系列常规外辐射源雷达中不曾遇到或虽遇到却无此突出的新问题。这些核心问题从式(1)模型中可见一斑, 主要体现在更严重的直达波和地物杂波(统称为多径杂波)阻碍目标检测, 单频网模糊问题影响目标判别和定位, 以及接收站点布置决定实用化效果。下面分述各项核心问题及应对的关键技术。

3.1 更严重的多径杂波

根据式(1)模型, 相对于单发射站情况, 单频网中多径杂波的数量变为原来的 P 倍, 故单频网在体

制上是一种多径环境, 复杂度与单频网规模相关。图 2 给出了单频网外辐射源雷达与常规外辐射源雷达杂波对比的实测结果图, 两组数据得自同一场景, 频率均位于 UHF 波段, 不同之处在于一者基于单频网照射源, 另一者基于单发射站。非单频网情况下, 杂波呈单主峰特性, 主峰对应直达波, 杂波强度随双基距离增加而递减, 与之不同的是, 单频网中杂波呈多主峰特征, 对应多同源发射站结构, 甚至第 1 径直达波并非最强的直达波, 这与不同传播路径上的地形地物有关, 单频网多站所贡献的直达波及地物杂波使得 SDPR 面临更严重的杂波问题。杂波数量的倍增使得 SDPR 中下述问题更为突出, 即系统动态需求、参考信号获取和杂波抑制。

(1) 系统动态需求

接收系统须根据动态需求设计, 具体地, 模拟前端和数字前端的动态需求取决于接收信号的动态范围。接收信号动态范围是指信号可能达到的最大功率与噪声基底的比值。该比值可视为 3 个部分的贡献之和: 一是单条径(主要是直达波)信号平均功率与噪声功率的比值; 二是信号波形自身贡献, 若信号非恒模, 则信号本身的峰均功率比会提高动态需求; 此外, 由于信号为连续波, 各路径信号叠加在一块, 会进一步提高信号峰值, 从而增加动态范围需求。具体到单频网配置中, 首先, 多个同源发射站可能从各个不同方向照射到发射站, 传统的通过物理遮挡降低直达波功率的方式较难奏效; 其次, 目前单频网体制的主流信号为 OFDM 信号, 其为多载波调制的非恒模信号, 具有较高的峰均功率比; 最后, 由于单频网中多径杂波的数量变为原来的 P 倍, 众多信号的叠加进一步加剧了单频网外辐射源雷达对动态范围的需求。例如, 若某接收端

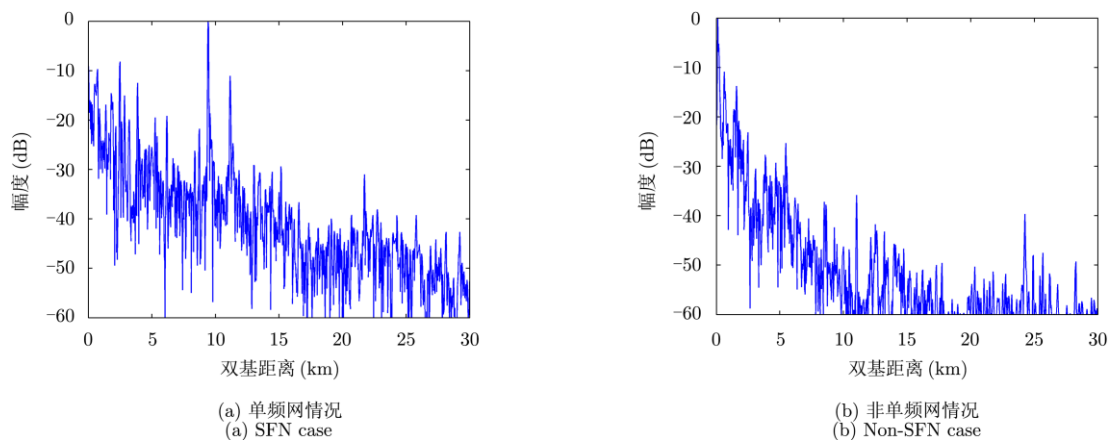


图 2 单频网外辐射源雷达与常规外辐射源雷达的杂波对比

Fig. 2 Clutter comparison between SFN passive radar and conventional passive radar

的单径直达波信噪比为 45 dB, 信号峰值功率比为 12 dB, 多径信号叠加贡献额外 10 dB, 则系统硬件的动态范围需求为 67 dB, 这对模拟前端提出了较高的设计要求。针对此问题, 除可考虑优化系统设计外, 还应在接收站位布置上下功夫。

(2) 参考信号获取

参考信号获取也称直达波提纯, 参考信号用作时域杂波抑制的参考样本和相关处理的匹配样本, 多径分量的存在会影响杂波抑制性能, 且相关处理时可能导致一个目标被检测出多个目标, 增加虚警。参考信号获取的目的就在于滤除多径分量, 提取纯净的直达波。现有的参考信号获取方法可大致分为两类: 一类利用直达波的空域信息, 如利用方向性天线或形成波束指向发射站方向得到参考信号; 另一类则依据信号的波形结构特征, 包括恒模算法^[7]、基于编解码的重构算法^[8-12]等。基于空域信息的方法在单频网下(特别是密集单频网)会面临困难, 因为此时有可能波束主瓣内不止一个发射站, 而恒模算法也不适用于 OFDM 非恒模波形。基于编解码的重构算法在单频网参考信号获取中展现出较好应用前景, 但仍需进一步解决时间同步、载波频偏以及采样率频偏等因素所带来的负面影响。

(3) 杂波抑制

强直达波及地物杂波掩盖目标以及降低系统灵敏度是外辐射源雷达所普遍面临的问题。在单频网体制下, 杂波抑制面临新问题, 这主要取决于杂波的时域和空域特征。相比于单发射站, 单频网中的杂波在时域上具有更大扩展, 空域上分布更广, 常规的时域杂波抑制算法需要更高的阶数, 运算量巨大, 算法实时性难以保证, 而空域算法抑制杂波时需耗费更多的空域自由度, 中小型阵列下易出现自由度过载, 也面临着主瓣杂波问题。就单频

网杂波抑制这一问题, 既要考虑更先进有效的信号处理方法, 如快速时域抑制方法^[13,14]、分载波处理方法^[15-18]、时域与空域结合方法等, 又要从系统配置上缓和杂波抑制的需求, 如可考虑正交极化、站位布置等。

3.2 目标单频网模糊

根据式(1)模型所述, 各个站除贡献杂波外, 也有可能同时照射到目标而被检测出, 造成一个目标在 2 维相关谱上检出多个峰值, 也即一个目标可能有多个量测, 且量测与发射站之间的对应关系先验未知, 这种模糊对应关系已在式(2)模型中用量测方程的不确定性来描述。为更为直观地揭示该种模糊所能导致的后果, 图 3 中给出了相同双发一收系统几何配置下某次观测分别在非单频网和单频网情况下的似然函数, 图 3 中发射站 1 位置为(-20, 10) km, 发射站 2 位置为(20, 10) km, 接收站位置为(0, 0), 目标位置为(0.5, 40) km, 检测概率为 1, 虚警率为 0, 双基距离量测精度为 100 m, 方位精度为 3°。单频网情况下由于考虑了量测与发射站的关联组合, 故其似然函数是各种关联组合项之和。对比可以发现, 相比于非单频网中似然峰对应真实目标的情况, 单频网中非目标位置多出了一个模糊峰值, 该峰甚至可能超过目标位置的似然值, 后续处理时容易将其误判为目标, 形成虚假航迹, 该种模糊点成为鬼点(ghost), 这种由单频网体制下发射站与量测关联模糊导致的跟踪定位模糊问题称为单频网模糊问题。

应该注意到, 单频网模糊问题与天波雷达中的多径模糊问题有相似之处。电离层的多层结构可能导致一个目标产生多个量测, 而量测与传播模式间的对应关系是模糊的。天波雷达常采用变频手段获得单模传播, 或依据不同电离层的多普勒特性来识

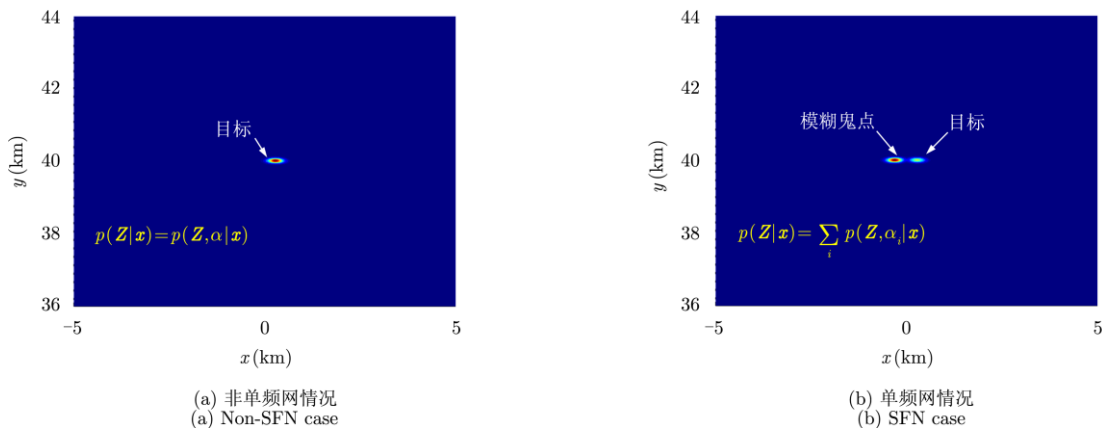


图 3 两发一收系统中某次观测的似然函数

Fig. 3 Likelihood function of an observation in a T²-R system

别模式, 从而解多径模糊。但这些手段并不适合 SDPR, 因为 SDPR 中的发射配置不可控, 并且对流程中各路径的多普勒等特征差别亦不明显。此外, 天波雷达中产生多径模糊的传播模式通常较少, 一般假设有 E 层和 F 层组合而得 4 种模式, 而单频网中同源发射站数量的散布范围却很大, 从几个到数十个不等。可能的关联假设数随同源发射站数量的增加呈现阶乘式增长, 例如 1 个目标受 10 个发射站照射产生 7 个目标量测(存在 3 个漏检), 外加 5 个虚警量测, 那么关联假设数最大可达 $\sum_{i=0}^{10} C_{10}^i A_{i2}^i = 2581284541$, 如此巨大的关联假设数导致无法承受的运算量。而且, 若误判的关联假设均由目标量测构成, 由于目标量测在时间序列上具有较强相关性(虚警量测在时间序列上通常不相关), 误判易前后互联形成虚假航迹。因此, 相对于天波雷达解多径模糊, 尽管 SDPR 的解模糊无须应对诸如电离层这类复杂传播介质, 但其仍面临其他方面的诸多难点和挑战, 须根据其特点针对性地提出解决方法。

目前与单频网模糊问题相关的研究报道较少。德国学者 Martina Daun 对该问题关注较早^[19], 其将跟踪分为若干阶段, 其中第 2 阶段专门用来剔除 ghost, 所采用的方法是现有的 SPRT(序列概率似然比测试)和 0-1 整数规划关联方法的扩展^[20], 该类方法具有一定实用性, 但其在利用单频网特征上有待加强。另一类方法是从整体上将单频网目标跟踪问题建模为一个高维分配问题, 通过求解该分配问题以期得到最优解或近似最优解^[21-23], 这类方法的特点在于模型上最优或近似最优, 但求解上存在困难, 故求解时采取了系列近似, 但运算量依然限制其实用性, 特别是存在较多同源发射站时。也有文献讨论利用模糊航迹形成和航迹关联的定位方法^[24]。其他的还有讨论单频网下量测与航迹的关联问题^[25], 所采用的方法与高频天波雷达中的 MPDA 方法类似^[26]。总体上说, 上述文献都隐含有模糊可解的前提假定, 对模糊的机理分析还有待加强, 庞大运算量限制实用性这一问题仍有待进一步研究解决。简言之, 单频网模糊问题仍是 SDPR 研究中一个亟待深入的前沿问题。

实际上, 单频网模糊问题的解决是一项系统工程。首要问题是获得解模糊的条件, 基于此条件提出降维算法, 并从系统上优化配置从而使其便于解模糊。

3.3 接收站布置

SDPR 是多基地雷达的一个特殊子类, 常规多基地雷达布站所面临的主要问题同样也会存在于

SDPR 之中。另外, SDPR 的布站也存在一些新特点, 首先是由其外辐射源的特质决定, 此时布站实质上是指接收站布置; 二者与单频网紧密相关, 故布站时必须考虑上述提到的多径杂波和单频网模糊等因素。具体地, SDPR 的接收站布置具有如下特征:

- (1) 考虑到动态范围的限制, 接收站离各个发射站不能太近;
- (2) 多径杂波对目标检测的影响必须考虑到检测概率之中;
- (3) 有效覆盖不再单纯指“至少有一个发射接收对检测到目标的概率大于某指定值”, 而必须考虑单频网解模糊条件这一约束;
- (4) 在满足有效覆盖的基础上还需优化定位及解模糊性能。

众所周知, 由于外辐射源中发射站和发射波形均不受控, 接收站是可由雷达设计者自主配置的为数不多的几项因素之一, 接收站的合理优化布置是外辐射源雷达探测性能的“倍增器”, 也是其从理论走向实用的关键一环。目前多基地外辐射源雷达优化布站研究大致可归纳为两个方面: (1) 优化选取接收站位, 使覆盖面积最大^[27,28]; (2) 对于一定的感兴趣区域, 以最优化漏检概率、信噪比、定位精度等为指标来确定站位^[29-31]。尽管该项研究已开展部分工作, 但多基地外辐射源雷达优化布站这一课题仍是亟待开垦的领域, 已有的研究成果离实用仍相距甚远。就一个实际问题为例, 对于一块感兴趣区域, 该布设多少接收站以及如何布设才能实现对感兴趣目标的有效探测是用户关注的问题, 目前公开报道的文献中未见对类似问题的正面回答。事实上, 该问题牵涉甚广, 既涉及电波传播理论, 亦与系统各部分的指标和要求密切相关, 单频网配置更为该问题提出了新要求。目前已报道文献中未见考虑单频网情况, 且多针对单接收站而讨论。

一份合理的 SDPR 优化布站方案应具有这样几个特征: (1) 模型抽象化。优化布站模型的建立虽考虑实际因素, 却不依赖于某一特定的场景, 故而具备通用性。(2) 流程模块化。方案各部分既相互依赖, 又相对独立, 且在现有认知条件下可能的未知因素也须考虑在内, 以便将来认识到时可容纳进来, 各模块可由更先进适用的新模块所替代, 因此可方便升级。(3) 计算可实现。由于搜索范围广, 搜索维数高, 基于穷举法的方案常因巨大运算量而致无法实现, 因此方案在优化性能的同时亦需兼顾算法可实现性。

4 实验结果

武汉大学电波传播实验室自 2008 年起即开始关注 SDPR 系统及其关键技术的研究,已研制出多种不同类型的实验系统并在多地建有实验观测与演示示范基地,开展了长期的目标探测及对比实验,取得了一批具有重要应用价值的研究成果。我国不同地区数字广播电视覆盖水平差异较大,武汉地区现已覆盖的数字广播电视包括 CMMB 和 DTMB,其中 CMMB 系统采用单频网工作体制,DTMB 为单站覆盖体制,故 SDPR 实验主要以 CMMB 为载体而展开。下面主要从信号和数据处理层面阐述 SDPR 体制的可行性,数据采用在天河国际机场采集的一组实测数据。

首先关注参考信号获取,CMMB 信号结构中包含了同步信号、导频等信息,可用于系统同步和信道估计。其中,信道估计结果给出的是信道的冲激响应,可利用其表征信号的传播环境。图 4 给出了一幅参考通道接收信号的信道响应图,与图 2(a)中的单频网杂波情况类似,信道响应呈现多个突出主峰值特性,说明尽管利用了空域信息,但参考通道接收信号中依然包含有多条与首径直达波能量相当的来波成分,必须进行提纯处理,否则直接与监测信号相关会使得单个回波形成多个相关峰值。为进一步揭示多径的影响,并验证重构方法提纯的有效性,下面通过比较信道均衡前后的效果阐释该问题。图 5 给出了信道均衡前后以频域符号实部为横轴、虚部为纵轴而绘制的散点图,该种图在通信中称为星座图。可见,信道均衡前,散点图混做一团,无典型特征,而均衡后,散点图呈现出 16QAM 星座图特征,这正好与通信解调所得 16QAM 映射方式的先验信息相符。由于存在噪声和估计误差,解调后的复符号并不完全准确出现在星座点处,而

是聚集在准确位置周围,经判决纠错处理后可得更纯净的码流,验证了重构算法用于参考信号获取的正确性与有效性。

对于单频网中的杂波抑制问题,图 6(a)为单个通道信号未作杂波抑制时与参考信号相干积累的结果,其典型特征是零多普勒位置存在多个强杂波峰,对应单频网结构的多发射信号,强杂波所在距离元的多普勒旁瓣亦可以观察到。由于多径杂波太强,多数目标淹没在杂波的旁瓣之下,需要进行杂波抑制处理。图 6(b)给出了使用分载波空域处理方法抑制杂波后的结果,波束对准民航飞机降落方位,可以看到零多普勒位置的强多径杂波得到有效抑制,目标突显于基底之上,验证了分载波处理方法在该单频网实验场景下可有效抑制杂波,而近距离零多普勒附近高出基底的成分可能是残余杂波,亦可能部分源自地面慢速目标的贡献。同时,同一方位集中出现多个目标峰值,远多于实验数据记录中的目标分布密度,经验证知部分峰值由多站照射所引起,即上述提到的单频网模糊问题。

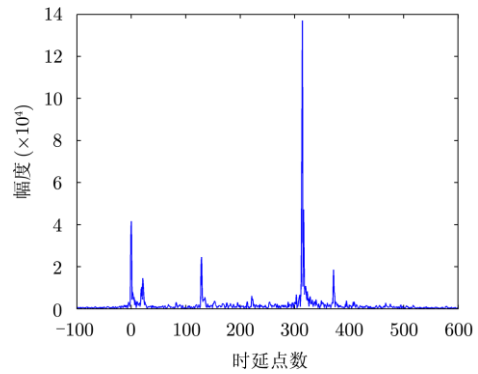


图 4 参考通道信道响应

Fig. 4 Impulse response of reference channel

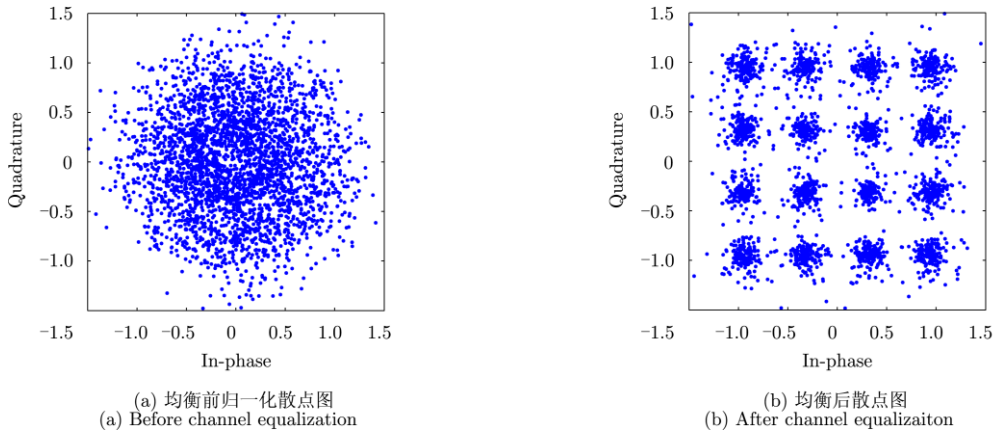


图 5 信道均衡前后的频域符号散点图比较

Fig. 5 Constellation diagram before and after channel equalization

在该单频网场景中，若不考虑量测与发射站的模糊对应关系，而任意选定发射站，将会导致众多的多径虚假航迹，图 7(a)给出了该组实测数据未经解模糊处理的实测结果，可见航迹数量众多且杂乱，这与实验当时的实际情况不符，故必须进行解模糊处理从而

得到目标的真实航迹。武汉大学已针对单频网模糊问题开展了一系列解模糊研究工作，提出一种 SDPR 目标跟踪算法。用该算法处理前述实测数据所得解模糊后的航迹如图 7(b)所示，目标航迹与实验记录信息相符，验证了所提单频网解模糊方法的正确性。

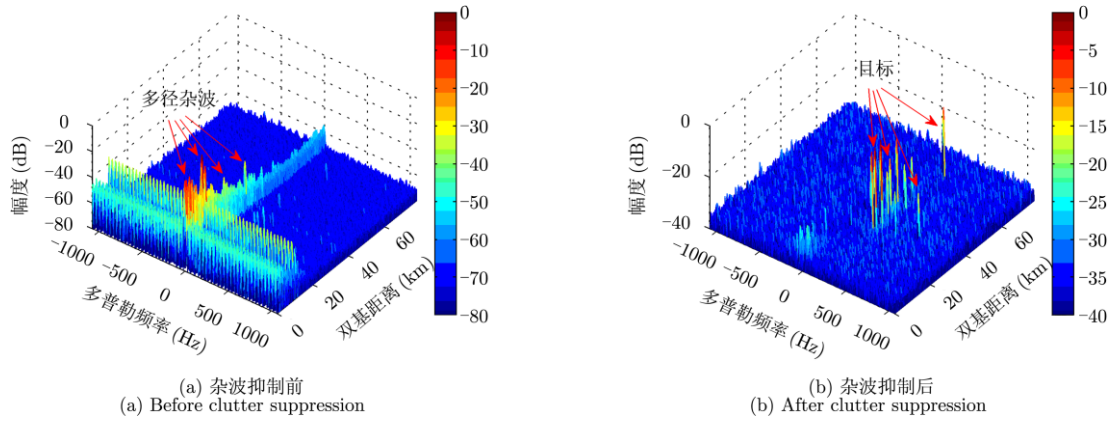


图 6 杂波抑制前后的距离多普勒谱

Fig. 6 Range Doppler spectrum before and after clutter suppression

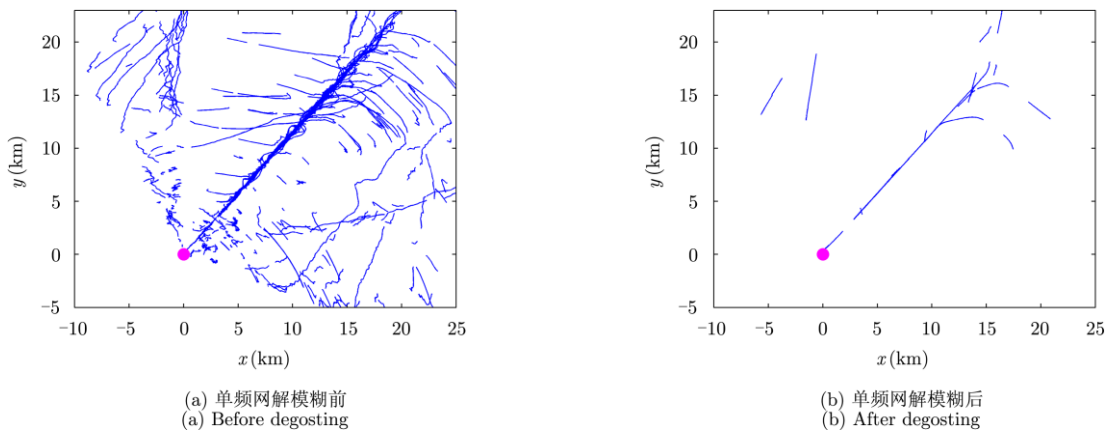


图 7 单频网解模糊前后的目标航迹

Fig. 7 Target track before and after degosting

5 结束语

本文阐释并论证了一种基于单频网广播电视照射源的新体制分布式外辐射源雷达架构。揭示了分布式探测体制是单频网配置下的必然选择，概述了 SDPR 所面临的 3 方面的主要问题，即多径杂波、单频网模糊和接收站布置，并利用实测数据证实了相关处理策略的可行性，从而展示了 SDPR 的良好应用前景和发展潜力。

当前，我国正在全面推进三网融合(电信网、计算机网、广播电视网)的建设，但数字广播电视无线网发展明显滞后，目前尚处于前期规划与建设初期，受众用户极为有限。三网融合的内涵是动态

变化和不断发展的，建议我国应加强军民无线电频谱管理、无线广播电视规划、通信设施服务等部门统筹协调，联合雷达新技术研究与应用部门做好顶层设计，将基于广播电视信号的雷达探测网也融入其中，以期实现四网融合，真正实现“军民融合，寓军于民，能军能民，以民养军”。

今天，广播电视的数字化已经成为不可逆转的世界潮流，国家发改委制定了全面实现广播电视数字化的战略规划，并计划于 2015 年实现数字化转换并停播模拟信号。可以预见，随着国家广播电视数字化的开展，一张甚至数张全国性的单频网将逐步建成并投入使用，依托 SDPR 的研究，该网在用

于民用广播通信的同时,全国性无缝覆盖的雷达探测网也相应建立,其将在空中目标监视、通用航空管制、应对突发事件、打击恐怖犯罪等领域发挥巨大的社会效益,开辟广阔的市场空间。

参考文献

- [1] Kuschel H. Approaching 80 years of passive radar [C]. 2013 International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2013: 213-217.
- [2] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 109-123.
Wan Xian-rong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109-123.
- [3] Mertens M, Koch W, and Kirubarajan T. Exploiting Doppler blind zone information for ground moving target tracking with bistatic airborne radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 130-148.
- [4] Wan Xian-rong, Yi Jian-xin, Zhao Zhi-xin, *et al.* Experimental research for CMMB-based passive radar under a multipath environment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 70-85.
- [5] 万显荣, 易建新, 方高, 等. 三坐标数字电视外辐射源雷达实验研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7): 1263-1268.
Wan Xian-rong, Yi Jian-xin, Fang Gao, *et al.* Experimental research of digital television based three-dimensional passive radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(7): 1263-1268.
- [6] Colone F, Bongioanni C, and Lombardo P. Multifrequency integration in FM radio-based passive bistatic radar, part I: target detection[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(4): 28-39.
- [7] 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.
- [8] Baczyk M K and Malanowski M. Decoding and reconstruction of reference DVB-T signal in passive radar systems[C]. The 11th International Radar Symposium (IRS), Vilnius, Lithuania, 2010: 1-4.
- [9] 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, Lithuania, 2010: 48-51.
- [10] 万显荣, 岑博, 易建新, 等. 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[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 338-343.
Wan Xian-rong, Cen bo, Yi Jian-xin, *et al.* Reference signal extraction methods for CMMB-based passive bistatic radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 338-343.
- [11] Wan Xian-rong, Wang Jun-fang, Hong Sheng, *et al.* Reconstruction of reference signal for DTMB-based passive radar systems[C]. IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, 2011: 165-168.
- [12] 万显荣, 张德磊, 柯亨玉, 等. 全球性数字广播高频外辐射源雷达参考信号重构[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2231-2236.
Wan Xian-rong, Zhang De-lei, Ke Heng-yu, *et al.* Reference signal reconstruction of HF passive bistatic radar based on DRM digital broadcasting[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(11): 2231-2236.
- [13] 张各各, 王俊, 刘玉春. 一种基于数字电视地面广播照射源的外辐射源雷达快速杂波相消算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 36-40.
Zhang Ge-ge, Wang Jun, and Liu Yu-chun. A fast cancellation algorithm for DTTB-based passive radar system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(1): 36-40.
- [14] 方亮, 万显荣, 易建新, 等. 基于梯度自适应格型滤波的外辐射源雷达多径杂波抑制算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2291-2296.
Fang Liang, Wan Xian-rong, Yi Jian-xin, *et al.* Multipath clutter mitigation for passive radar based on gradient adaptive lattice filter[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(11): 2291-2296.
- [15] Poullin D. Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 143-152.
- [16] 赵志欣, 万显荣, 邵启红, 等. DRM 无源雷达多径杂波的分载波空域抑制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 13-17.
Zhao Zhi-xin, Wan Xian-rong, Shao Qi-hong, *et al.* Multipath clutter suppression by spatial filtering on each carrier in DRM-based passive radar[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(3): 13-17.
- [17] Zhao Zhi-xin, Wan Xian-rong, Shao Qi-hong, *et al.* Multipath clutter rejection for digital radio mondiale-based HF passive bistatic radar with OFDM waveform[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(9): 867-872.
- [18] Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, Zhao Zhi-xin, *et al.* Subcarrier-based processing for clutter rejection in CP-OFDM signal-based passive radar using SFN configuration[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 1-13.
- [19] Daun M and Koch W. Multistatic target tracking for non-cooperative illumination by DAB/DVB-T[C]. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1-6.

- [20] Daun M, Nickel U, and Koch W. Tracking in multistatic passive radar systems using DAB/DVB illumination[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(6): 1365–1386.
- [21] Radmard M, Karbasi S M, Khalaj B H, *et al.* Data association in multi-input single-output passive coherent location schemes[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(3): 149–156.
- [22] Tharmarasa R, Subramaniam M, Nadarajah N, *et al.* Multitarget passive coherent location with transmitter-origin and target-altitude uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2530–2550.
- [23] Sathyan T, Chin T J, Arulampalam S, *et al.* A multiple hypothesis tracker for multitarget tracking with multiple simultaneous measurements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2013, 7(3): 448–460.
- [24] 高志文, 陶然, 王越. 单频网数字电视广播辐射源雷达目标定位算法[J]. *兵工学报*, 2010, 31(6): 791–795.
Gao Zhi-wen, Tao Ran, and Wang Yue. Target location for passive radar in single frequency network[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(6): 791–795.
- [25] Choi S, Crouse D F, Willett P, *et al.* Approaches to Cartesian data association passive radar tracking in a DAB/DVB network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 649–663.
- [26] Pulford G W and Evans R J. A multipath data association tracker for over-the-horizon radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(4): 1165–1183.
- [27] Isohookana M and Pyykönen J. Design of a passive radar network[C]. Proceedings of the 7th European Radar Conference, Paris, France, 2010: 443–449.
- [28] Barott W C and Himed B. Simulation model for wide-area multi-service passive radar coverage predictions[C]. IEEE Radar Conference (RADAR), Ottawa, Canada, 2013: 1–4.
- [29] Chitgarha M M, Majd M N, *et al.* Choosing the position of the receiver in a MISO passive radar system[C]. Proceedings of the 9th European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, 2012: 318–321.
- [30] Chitgarha M M, Radmard M, *et al.* The detector's output SNR as a criterion for receiver placement in MIMO DVB-T based passive coherent location[C]. 4th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, Petersburg, Russia, 2012: 431–435.
- [31] Gumiero F and Nucciarone C. Multistatic passive radar geometry optimization for target 3D positioning accuracy[C]. Proceedings of the 7th European Radar Conference, Paris, France, 2010: 467–470.

作者简介



万显荣(1975–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新体制雷达系统设计、阵列信号处理等。

E-mail: xrwan@whu.edu.cn



易建新(1989–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为雷达系统与信号处理。

E-mail: jxyi@whu.edu.cn