

文章编号: 2095-4980(2024)03-0337-08

## 基于子载波提取的 OFDM 无源雷达频率分集方法

饶云华<sup>a,b</sup>, 贺浩<sup>a</sup>, 万显荣<sup>a,b</sup>, 易建新<sup>a,b</sup>

(武汉大学 a. 电子信息学院, 湖北 武汉 430072; b. 深圳研究院, 广东 深圳 518063)

**摘要:** 为了解决当前正交频分复用(OFDM)无源雷达波束形成无法对分布于同一角度不同距离处的目标信号进行区别处理的问题, 提出了一种基于回波信号子载波提取的频率分集新方法。通过对接收阵列不同通道 OFDM 数据提取不同频率的子载波信号并独立地进行处理, 使得接收端波束图具有距离-角度依赖性, 从而可实现对同一角度内不同距离处的目标分别处理, 同时分析了不同频率分集处理参数对波束图性能的影响。该频率分集处理方式可以提高距离维信号处理自由度, 使得接收波束能量可聚焦于期望目标点处从而提升雷达目标检测、定位和杂波抑制等性能。仿真分析表明 OFDM 无源雷达回波信号经频率分集处理后可获得点状波束图, 并通过实测数据分析验证了该方法的有效性与实用性。

**关键词:** 无源雷达; 频率分集; OFDM 信号; 点状波束

**中图分类号:** TN958.97

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2022046

## Frequency diverse method for OFDM passive radar based on subcarrier extraction

RAO Yunhua<sup>a,b</sup>, HE Hao<sup>a</sup>, WAN Xianrong<sup>a,b</sup>, YI Jianxin<sup>a,b</sup>

(a.School of Electronic Information, Wuhan Hubei 430072, China; b.Shenzhen Research Institute, Shenzhen Guangdong 518063, China, Wuhan University)

**Abstract:** The beamforming method of current Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) passive radar cannot effectively distinguish the target signals distributed at the same angle and different distances. A new frequency diverse processing method based on subcarrier extraction of passive radar receiving signal is proposed. The beampattern can be turned into range-angle dependent by extracting and processing different subcarriers independently for each receiving channel, thus the targets distributed at the same angle and different distances can be processed differently. And the effect of parameters in frequency diverse processing is also investigated. The increased degree of freedom in range dimension with frequency diverse processing can help focus the beam energy on the desired point in space, which improves the performance of radar in target detection, location, and clutter suppression. Simulation analysis shows that a dot-shaped beampattern can be obtained with frequency diverse processing for OFDM passive radar receiving signals, and the experimental results also verify the effectiveness and the practicability of the proposed method.

**Keywords:** passive radar; frequency diverse; OFDM signal; dot-shaped beampattern

近年来, 采用第三方信号作为外部照射源的无源雷达逐渐成为雷达领域的研究热点。无源雷达通常采用多通道阵列接收回波信号, 接收端可以利用自适应波束形成抑制干扰所在角度回波信号, 并使来自目标方位回波信号获得最大波束增益<sup>[1]</sup>。然而该方法所形成的波束图仅能指向某一特定角度<sup>[2-3]</sup>, 当目标与干扰分布于同一角度不同距离时, 则无法对二者进行有效的区别处理。

与相控阵(Phased Array, PA)不同, 频率分集阵列(Frequency Diverse Array, FDA)在相邻阵元发射信号的载波间引入微小频偏, 使其发射波束图能以相同角度指向不同距离<sup>[4-6]</sup>。这一特性使得 FDA 可应用于抑制距离相关干扰、联合估计目标参数等场景, 因此近年来研究者围绕频率分集阵列开展了广泛研究。为了优化发射端波束图并使其具

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271400; 62071335; 61931015); 苏州市重点产业技术创新项目(SYG202007); 湖北省技术创新专项重大资助项目(2019AAA061); 深圳市科技计划资助项目(JCYJ20170818112037398); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2021CFA002)

有更佳的距离维波束聚焦能力, 研究者提出了非线性增加发射阵元间距<sup>[7]</sup>以及单个阵元发射多个载波信号的方法<sup>[8]</sup>。同时, 针对频率分集阵列发射波束图的时变特性, 文献[9]引入时变频偏从而获得了时不变的聚焦波束。文献[10]对频率分集阵列波束形成方法进行了研究, 从而提出了根据需要动态调整聚焦波束的方法。基于FDA发射波束图的距离依赖特性, 文献[11]提出了一种抑制距离依赖性干扰的方法。为了评估频率分集阵列雷达的参数估计性能, 文献[12]推导了频率分集阵列的广义模糊函数, 并分析了频偏对距离分辨力、距离模糊与多普勒模糊的影响。文献[13]还提出了一种基于FDA的距离-角度解耦模型以提升目标参数估计精确度。针对频率分集阵列雷达的目标检测问题, 文献[14]提出了一种具有最优参数的空时匹配滤波器设计方法, 文献[15]将FDA与多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)相结合, 并设计了一种基于广义似然比检测的自适应目标检测器。

以上研究表明, 频率分集方法可以提高信号处理自由度并提升雷达性能。然而, 当前频率分集研究都是对发射信号进行调整以实现发射波束图的设计与优化, 在接收端仍然采用传统的相控阵方法。无源雷达采用不可控的第三方发射信号作为外部照射源, 无法在发射端采用频率分集方法。近年来随着数字广播与无线通信领域的快速发展, 具有更高传输效率与频谱利用率的OFDM信号也得到广泛应用。与传统模拟信号与单载频信号不同, OFDM信号是一种多载波调制信号, 单个OFDM符号包含多个频率相互正交的子载波, 这使得基于OFDM信号的无源雷达在接收端进行频率分集处理成为可能。

因此, 本文提出了一种对OFDM无源雷达接收阵列回波信号进行子载波提取的频率分集处理新方法。在不增加当前无源雷达系统复杂度的条件下, 该方法可将波束能量聚焦于目标所在点从而提升回波信号的输出信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR), 并进一步提升无源雷达的目标检测、定位性能。

## 1 OFDM无源雷达信号模型

无源雷达利用第三方信号作为外部照射源, 其接收系统通常包含参考通道(Reference Channel)与监测通道(Surveillance Channel)。参考通道指向第三方辐射源以获得纯净的直达波, 监测通道指向探测区域以接收目标回波。典型的OFDM无源雷达系统如图1所示, 图中信号自辐射源经不同的传播路径抵达接收系统, 其基线距离为 $d_0$ ; 目标回波的传播路径长度为 $r$ , 目标与阵列法向夹角为 $\theta$ 。

如图1所示, 单个OFDM符号包含 $K$ 个频率相互正交的子载波, 其基带信号模型见式(1):

$$u(t) = \sum_{k=0}^{K-1} C_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t \leq T_u \quad (1)$$

式中:  $k$ 为子载波序号;  $C_k$ 为第 $k$ 个子载波的调制信息;  $\Delta f$ 为相邻子载波间的频偏,  $\Delta f$ 与OFDM符号有效数据持续时间 $T_u$ 之间满足 $\Delta f = 1/T_u$ 。将基带信号上变频至载频 $f_0$ 后的发射信号模型如式(2):

$$x(t) = e^{j2\pi f_0 t} u(t) = e^{j2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{K-1} C_k e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (2)$$

监测天线阵列第 $n$ 个阵元接收的目标反射回波信号经下变频后如式(3):

$$\text{surv}_n(t) = \alpha_n e^{-j2\pi f_0 \tau_n} \sum_{k=0}^{K-1} C_k e^{j2\pi k \Delta f (t - \tau_n)} = \alpha_n \psi_n u(t - \tau_n) \quad (3)$$

式中:  $\alpha_n$ 为监测通道的第 $n$ 个阵元接收信号复系数;  $\tau_n$ 为目标回波传播时延, 可将其表示为 $\tau_n = (r - nd \sin \theta)/c$ ;  $\psi_n$ 为监测通道的第 $n$ 个阵元接收信号传播过程中引入的相位偏移项。

参考通道接收信号经下变频处理后如式(4):

$$\text{ref}(t) = \beta e^{-j2\pi f_0 \frac{d_0}{c}} \sum_{k=0}^{K-1} C_k e^{j2\pi k \Delta f (t - d_0/c)} = \beta \psi_{\text{ref}} u(t - d_0/c) \quad (4)$$

式中:  $\beta$ 为参考通道接收信号复系数;  $L$ 为基线距离;  $c$ 为自然界光速;  $\psi_{\text{ref}}$ 为参考通道接收信号传播过程中引入的相位偏移项。

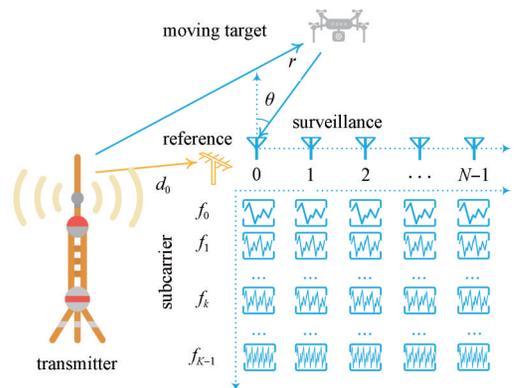


Fig.1 OFDM passive radar system  
图1 OFDM无源雷达系统

## 2 频率分集模型

基于第  $n$  个监测通道接收信号  $\text{surv}_n(t)$  与参考通道接收信号  $\text{ref}(t)$ ，可对第  $n$  个监测通道构建信号  $s_n(t)$ ，如式(5)：

$$s_n(t) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F}[\text{surv}_n(t)] \odot \mathcal{F}[\text{ref}(t)]^* \right\} \quad (5)$$

式中： $\mathcal{F}[\cdot]$  和  $\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$  为傅里叶变换与其反变换； $[\cdot]^*$  为取复共轭； $\odot$  为矩阵间的哈达玛积(Hadamard Product)。将式(5)展开并代入传播时延  $\tau_n$  后如式(6)所示：

$$s_n(t) = \alpha_n \beta^* \sum_{k=0}^{K-1} \|C_k\| \psi_n \psi_{\text{ref}}^* e^{j2\pi k \Delta f (t - (\tau_n - d_0/c))} = \alpha_n \beta^* \sum_{k=0}^{K-1} \|C_k\| e^{-j2\pi f_0 \frac{r - nd \sin \theta}{c}} e^{j2\pi f_0 \frac{d_0}{c}} e^{j2\pi k \Delta f (t - (r - nd \sin \theta - d_0)/c)} \quad (6)$$

式中  $e^{j2\pi k \Delta f \frac{nd \sin \theta}{c}}$  相较其他项可忽略其带来的影响，其中  $\|\cdot\|$  表示取其模值。则式(6)可简化为式(7)：

$$s_n(t) \approx \sum_{k=0}^{K-1} \zeta e^{j2\pi (f_0 nd \sin \theta - k \Delta f r')/c} e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (7)$$

式中  $\zeta = \alpha_n \beta^* \|C_k\| e^{-j2\pi f_0 \frac{r'}{c}}$  表示信号处理过程中的系数， $r' = r - d_0$  为目标双基距离与基线距离差值。当前无源雷达采取的相控阵接收模型对式(7)中信号  $s_n(t)$  分配权值  $w_n = e^{-j2\pi f_0 \frac{nd \sin \theta}{c}}$  后进行波束形成，其中  $\theta_i$  表示期望角度。其归一化波束图如式(8)：

$$B(\theta; t) = \left\| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w_n s_n(t) \right\| = \left\| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi f_0 \frac{nd \sin \theta}{c}} s_n(t) \right\| \quad (8)$$

由式(8)可见，传统无源雷达采取的相控阵接收模型波束图仅具有角度维波束指向，无法有效处理距离相关性问題。

由式(7)可见，信号  $s_n(t)$  由  $K$  个频率相互正交的子载波组成，利用子载波间的正交性可提取任意频率子载波数据并对其独立处理。单个子载波信号其相位偏移项同时受到目标距离与角度影响，则针对每个接收通道信号，可采用保留不同子载波来使每个接收通道信号的频率间具有微小偏移，从而实现频率分集处理，提高信号处理自由度。

### 2.1 线性频率分集方法

该方法对每一个监测天线阵元接收 OFDM 符号经处理后的信号  $s_n(t)$ ，仅保留 1 个子载波及其调制数据，而相邻阵元提取的子载波频率间遵循线性增长关系，即第  $n$  个监测天线单元仅保留其所接收 OFDM 数据的第  $n$  个子载波数据，则提取子载波后信号  $s'_n(t)$  如式(9)：

$$s'_n(t) = \zeta e^{j2\pi \left[ f_0 \frac{nd \sin \theta}{c} - n \Delta f \frac{r'}{c} \right]} e^{j2\pi n \Delta f t} \quad (9)$$

对各接收阵元提取子载波后的数据进行加权并归一化后的波束图如式(10)：

$$B(r, \theta; t) = \left\| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w_n s'_n(t) \right\| = \left\| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \zeta \exp \left\{ j2\pi n \left[ f_0 \frac{d(\sin \theta - \sin \theta_i)}{c} - \Delta f \frac{r' - r'_i}{c} \right] \right\} e^{j2\pi n \Delta f t} \right\| = \left\| \frac{1}{N} \zeta \frac{\sin \left\{ N\pi \left[ f_0 \frac{d(\sin \theta - \sin \theta_i)}{c} + \Delta f \left( t - \frac{r' - r'_i}{c} \right) \right] \right\}}{\sin \left\{ \pi \left[ f_0 \frac{d(\sin \theta - \sin \theta_i)}{c} + \Delta f \left( t - \frac{r' - r'_i}{c} \right) \right] \right\}} \right\| \quad (10)$$

式中权值为  $\mathbf{w} = [w_0 \cdots w_n \cdots w_{N-1}]$ ，其中第  $n$  项为  $w_n = e^{-j2\pi \left[ f_0 \frac{nd \sin \theta}{c} - n \Delta f \frac{r'}{c} \right]}$ ， $r'_i$  和  $\theta_i$  分别表示期望的距离与角度。

式(10)表明在某一固定时刻(如  $t = \tau$  时刻)，空间波束图可在期望距离-角度对  $(r'_i, \theta_i)$  处取得峰值。空间波束图呈现距离-角度依赖性，即可通过信号处理的方式将波束能量聚焦于不同距离处。相较于传统信号处理方式，频率分集处理提升了距离维信号处理自由度，可以对分布于同一角度不同距离处的干扰与目标进行进一步区别处理。

由式(10)可见,使空间波束图取峰值的距离-角度对并不唯一,且峰值呈现周期性出现,从而带来距离-角度模糊问题。

## 2.2 指数频率分集方法

对式(10)的分析可知,距离-角度周期性问题的起源于相邻阵元之间频偏的线性增长关系,因此可改变相邻阵元频偏的增长关系来消除距离-角度模糊。 $s_n(t)$  每个子载波频率固定且为基频的整数倍,如  $k\Delta f(k=0,1,\dots,K-1)$ ,同时子载波数量  $K$  通常远大于阵元数量  $N$ ,因此可以使  $N$  个阵元分别选择频率具有指数增长形式的子载波,如第  $n$  个接收阵元只选择其 OFDM 数据的第  $2^n$  个子载波。则第  $n$  个监测通道构建信号  $s_n(t)$  经指数频率提取后的  $s_n''(t)$  如式(11)所示,

$$s_n''(t) = \zeta e^{j2\pi \left[ f_0 \frac{nd \sin \theta}{c} - 2^n \Delta f \frac{r'}{c} \right]} e^{j2\pi 2^n \Delta f t} \quad (11)$$

采用式(12)的权矢量对提取子载波后的阵列数据进行波束形成:

$$\mathbf{w} = [w_0 \cdots w_n \cdots w_{N-1}] \quad (12)$$

式中第  $n$  项为  $w_n = e^{-j2\pi \left[ f_0 \frac{nd \sin \theta_l}{c} - 2^n \Delta f \frac{r'_l}{c} \right]}$ 。归一化后的波束图如式(13):

$$B(r, \theta; t) = \left\| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w_n s_n''(t) \right\| = \left\| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \zeta \exp \left\{ j2\pi \left[ f_0 \frac{nd (\sin \theta - \sin \theta_l)}{c} - 2^n \Delta f \frac{r' - r'_l}{c} \right] \right\} e^{j2\pi 2^n \Delta f t} \right\| \quad (13)$$

由式(13)可见,指数频率分集方法的波束图仅在距离-角度对  $(r'_l, \theta_l)$  上取得峰值,从而消除了线性频率分集方法的周期性。然而该方法与 2.1 节频率分集方法仅考虑提取单个子载波,而 OFDM 符号通常包含数千个子载波,单子载波提取方法会带来信号能量利用率不高的问题,并最终影响波束形成后的目标信号 SNR。

## 2.3 多载波频率分集方法

若每一个监测通道构建信号  $s_n(t)$  提取 OFDM 符号所有  $K$  个子载波中  $L$  个相邻子载波数据  $(L+N \leq K)$ ,则可提高信号的能量利用率。如式(14)所示,对于第  $n$  个监测通道构建信号  $s_n(t)$ ,保留从第  $n$  个到第  $n+L-1$  个子载波数据后的信号  $s_n'''(t)$  为:

$$s_n'''(t) = \sum_{l=0}^{L-1} s_{l,n}'''(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \zeta e^{j2\pi \left[ f_0 \frac{nd \sin \theta}{c} - (n+l)\Delta f \frac{r'}{c} \right]} e^{j2\pi (n+l)\Delta f t} \quad (14)$$

采用式(15)的权矢量进行波束形成:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{0,0} & \cdots & w_{0,n} & \cdots & w_{0,N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L,0} & \cdots & w_{L,n} & \cdots & w_{L,N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{L-1,0} & \cdots & w_{L-1,n} & \cdots & w_{L-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中  $w_{l,n} = e^{-j2\pi \left[ f_0 \frac{nd \sin \theta_l}{c} - (n+l)\Delta f \frac{r'_l}{c} \right]}$ ,  $r'_l$  和  $\theta_l$  分别表示在该距离与角度上形成点状波束,则波束形成后的归一化波束图如式(16)所示:

$$B(r, \theta; t) = \left\| \frac{1}{NL} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} w_{l,n} s_{l,n}'''(t) \right\| = \left\| \frac{1}{NL} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{L-1} \zeta \exp \left\{ j2\pi \left[ f_0 \frac{nd (\sin \theta - \sin \theta_l)}{c} - (n+l)\Delta f \frac{r' - r'_l}{c} \right] \right\} e^{j2\pi (n+l)\Delta f t} \right\| = \left\| \frac{1}{NL} \zeta \frac{\sin \left\{ N\pi \left[ f_0 \frac{d (\sin \theta - \sin \theta_l)}{c} + \Delta f \left( t - \frac{r' - r'_l}{c} \right) \right] \right\}}{\sin \left\{ \pi \left[ f_0 \frac{d (\sin \theta - \sin \theta_l)}{c} + \Delta f \left( t - \frac{r' - r'_l}{c} \right) \right] \right\}} \cdot \frac{\sin \left\{ L\pi \left[ \Delta f \left( t - \frac{r' - r'_l}{c} \right) \right] \right\}}{\sin \left\{ \pi \left[ \Delta f \left( t - \frac{r' - r'_l}{c} \right) \right] \right\}} \right\| \quad (16)$$

由式(16)可见,多载波频率分集波束图,可视为式(10)线性频率分集波束图受距离维 sinc 函数调制后的结果,该 sinc 函数在期望目标距离  $r'_l$  处取得峰值,仅受载波提取数量  $L$  所影响。因此多载波频率分集的波束图仅在单一的距离-角度对  $(r'_l, \theta_l)$  上取得峰值,消除了线性频率分集方法中出现的周期性距离-角度峰值问题。同时,采用多

载波频率分集使得更多的子载波能量被用于提升目标信号的 SNR，该方法还可根据需要动态地调整波束聚焦点。

### 3 仿真验证与实测数据分析

#### 3.1 空间波束图性能仿真分析

为了验证所提出频率分集方法的有效性，对接收频率分集所形成的波束图进行仿真。仿真参数如下：发射端所用信号为 OFDM 信号，单个符号包含 3 780 个子载波；相邻子载波间的频率偏移为 2 kHz；子载波调制数据类型为 4QAM；全向发射的信号载频为 756 MHz；接收端监测通道为阵元间距为 0.25 m 的 12 阵元均匀线阵；参考通道采用单个阵元；目标双基地距离差为 20 km，位于接收阵列以法线为基准逆时针 20° 处。后续分析过程中如无特别说明仿真参数保持相同。

基于上述仿真参数，对接收信号分别采用相控阵方法、线性频率分集、指数频率分集以及多载波频率分集处理，从而获得接收波束图，其中线性频率分集采用式(9)所示方法，对第  $n$  号监测通道仅保留第  $n$  个子载波数据；指数频率分集采用式(11)所示方法，对第  $n$  号监测通道仅保留第  $2^n$  个子载波数据；多载波频率分集采用式(14)所示方法，对第  $n$  号监测通道保留第  $n$  个子载波到第  $n+L-1$  个子载波数据，仿真结果如图 2~图 5 所示。

由图 2 可见，相控阵方法仅可获得指向某一特定角度的接收波束图，其能量分布于整个距离域。当干扰与目标分布于同一角度不同距离处时，目标回波与干扰无法区分。采用线性频率分集方法可生成具有距离-角度依赖性波束图，波束能量可被聚焦于不同距离处，从而提升目标检测性能，如图 3 所示。但其波束图呈“S”型曲线，会引入距离-角度模糊问题。

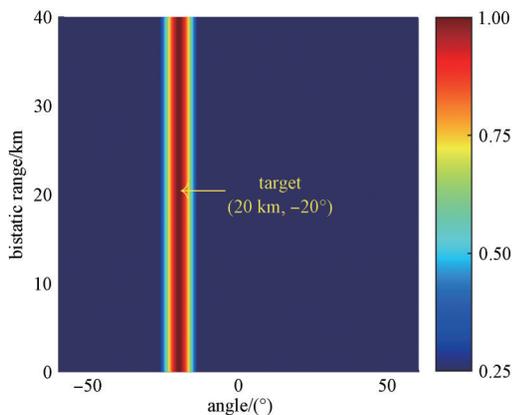


Fig.2 Beampattern of phased array  
图 2 相控阵方法波束图

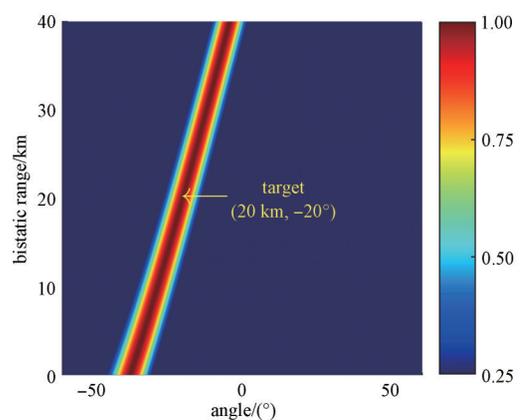


Fig.3 Beampattern of linear frequency diverse  
图 3 线性频率分集方法波束图

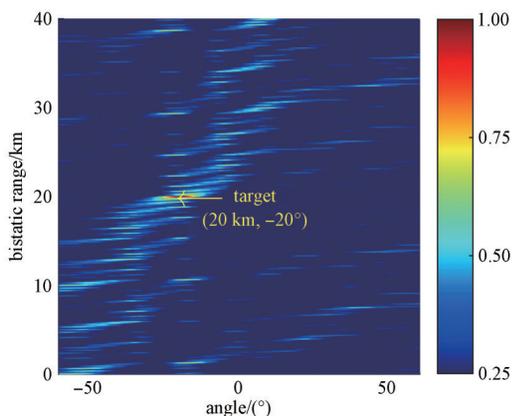


Fig.4 Beampattern of exponential frequency diverse  
图 4 指数频率分集方法波束图

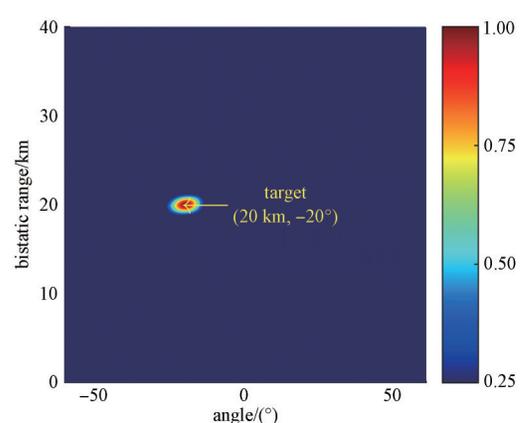


Fig.5 Beampattern of multi-carrier frequency diverse  
图 5 多载波频率分集方法波束图

采用指数频率分集方法所形成的波束图如图 4 所示，提取子载波后信号能量聚焦至单个点上，并消除了线性频率分集所带来的距离-角度模糊问题。但是图 4 中所示点状波束峰值附近存在一定的旁瓣。

当采用多子载波频率分集方法，每个接收阵元分别提取  $L = 80$  个子载波时，其空间波束图如图 5 所示，相比

图 4 具有更佳的能量聚焦效果与距离分辨力。因此, 采用提取多个子载波的方法可进一步提高点状波束聚焦性能和能量利用率。

### 3.2 提取子载波数量对多载波频率分集波束图的影响

多子载波频率分集可获得更好的波束性能, 由式(16)的分析可见, 多载波频率分集方法的波束图为线性频率分集波束图在距离维受 sinc 函数调制的结果, 其距离维主瓣宽度将受到 sinc 函数的一阶零点间距  $2c/(L\Delta f)$  影响, 而波束图的峰值能量则受到 sinc 函数峰值  $L$  与阵元数  $N$  乘积的影响, 因此子载波提取数量对波束图性能有着不同的影响。不同子载波提取数量的多载波频率分集波束如图 6~图 8 所示。

当第  $n$  个监测通道提取第  $n$  个到第  $n+L-1$  个子载波数据时 ( $L=50, 100, 500, 800$ ), 归一化波束图如图 6 所示。可见随着子载波提取数量的增加, 其信号利用的带宽增加, 距离维 sinc 函数取得的峰值  $L$  逐渐增加, 最终在波束方向图中表现为主瓣能量逐渐变高; 同时 sinc 函数的一阶零点间距  $2c/(L\Delta f)$  逐渐减小, 最终在波束方向图中表现为主瓣宽度的逐渐变窄。图 7 与图 8 展示了多载波频率分集方法子载波提取数量  $L=50$  到  $L=3\ 200$  过程中波束方向图的主瓣宽度与主瓣能量的变化趋势。由图 7 可见随着子载波提取数量  $L$  的增加, 主瓣宽度变窄的速度逐渐放缓, 主瓣宽度与子载波提取数量呈倒数下降趋势。同时, 随着子载波提取数量  $L$  的增加, 主瓣能量增长速度也逐渐放缓, 取对数后的主瓣能量与子载波提取数间呈对数增长趋势, 如图 8 所示。此外, 图 8 进一步展示了多载波频率分集方法其波束图的第一旁瓣能量随载波提取数量的变化趋势, 从图中可见随着子载波提取数量的增加, 第一旁瓣的能量同样呈现对数增长趋势, 但是与此同时第一旁瓣能量与主瓣能量之间保持着相对稳定的增长趋势。因此在频率分集方法的实际应用过程中, 还需要进一步考虑其波束旁瓣能量控制等问题。

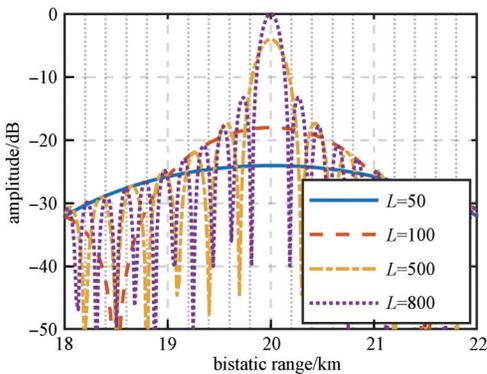


Fig.6 Range profile varying with carrier number  
图 6 距离维剖面随载波数变化趋势

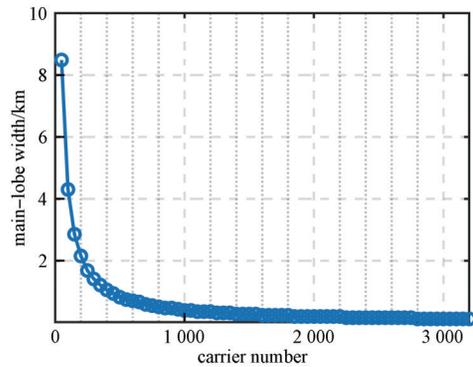


Fig.7 Main-lobe width varying with carrier number  
图 7 主瓣宽度随载波数变化趋势

### 3.3 实测数据分析

为了验证所提频率分集方法的实用性, 2021 年 7 月在内蒙古阿拉善盟进行了外场实验。实验中外部信号源采用阿拉善广播电视塔所发射的地面数字多媒体广播(Digital Television Terrestrial Multimedia Broadcasting, DTMB)数字地面电视信号, 发射站与接收站间基线距离为 18 km, 发射信号中心频率为 714 MHz, 该信号采用 OFDM 调制方式, 每个符号包含 3 780 个子载波, 相邻子载波间频率偏移为 2 kHz。接收端监测通道采用阵元间距  $d=0.25$  m 的 7 元均匀线阵。对接收每个通道数据进行杂波抑制后截取单个 OFDM 符号进行分析。信号采集过程中一个合作无人机位于双基地距离差 1.7 km 附近; 其方向为由阵列法线沿逆时针方向偏移约  $20^\circ$ 。

将接收数据分别采用相控阵方法与所提多载波频率分集方法处理。多载波频率分集载波提取方法与 3.2 节相同 ( $L=3\ 750$ )。经相控阵方法处理后所得归一化距离谱如图 9 所示, 位于 1.7 km 附近的目标回波尖峰被湮没。而经多载波频率分集方法处理后所得归一化距离谱如图 10 所示。由于频率分集处理可将波束能量聚焦于空间中目

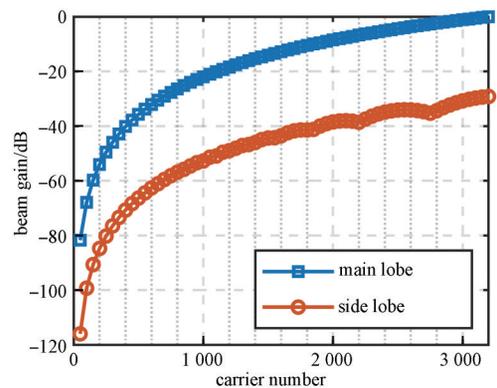


Fig.8 Main lobe and side lobe energy varying with carrier number  
图 8 主瓣能量与旁瓣能量随载波数变化趋势

标所在位置,从而使得来自目标的回波信号获得最佳波束增益,因此经频率分集处理后,目标回波尖峰被凸显,如图10所示。

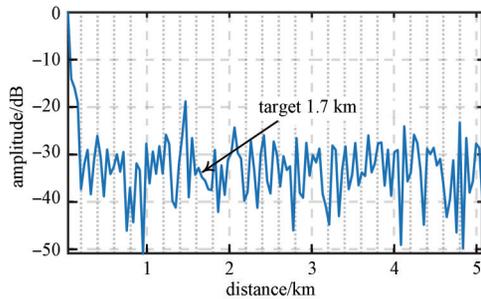


Fig.9 Range spectrum by phased array method  
图9 相控阵方法距离谱

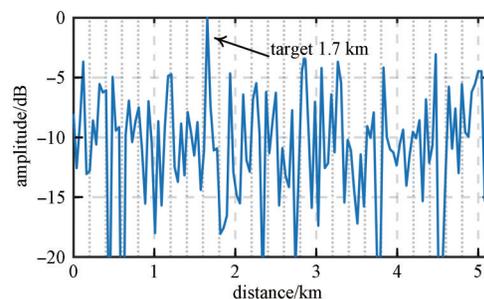


Fig.10 Range spectrum by multi-carrier frequency diverse method  
图10 多载波频率分集方法距离谱

#### 4 结论

本文首次提出了一种基于子载波提取的OFDM无源雷达频率分集方法,该方法可使得当前无源雷达获得距离维信号处理自由度增益。与传统相控阵接收模型不同,本文所提的频率分集方法所获得的接收波束方向图具有距离-角度依赖特性。聚焦于空间中期望目标点处的能量可以进一步提升雷达在目标检测、定位和杂波抑制方面的性能。且可采用多载波频率分集方法,通过增加提取子载波数量来克服信号能量利用问题。此外,本文所提方法仅针对OFDM无源雷达回波信号进行处理,不需要复杂的发射端支持,也不需要当前无源雷达的接收机硬件进行修改,极大地简化了系统复杂度。同时,本文首次利用实际雷达系统所采集数据对接收端频率分集处理,并进行了实验验证,证明了该方法的可行性与有效性。

#### 参考文献:

- [1] TAO R, WU H Z, SHAN T. Direct-path suppression by spatial filtering in digital television terrestrial broadcasting-based passive radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(6): 791–805. doi:10.1049/iet-rsn.2009.0138.
- [2] BOURNAKA G, O'HAGAN D W, KUSCHEL H. Array pattern synthesis techniques for circular array of antennas for passive radar applications[C]// 2014 11th European Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2014: 133–136. doi:10.1109/EuRAD.2014.6991225.
- [3] BOURNAKA G, BARUZZI A, HECKENBACH J, et al. Experimental validation of beamforming techniques for localization of moving target in passive radar[C]// 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). Arlington, VA, USA: IEEE, 2015: 1710–1713. doi:10.1109/RADAR.2015.7131274.
- [4] ANTONIK P, WICKS M C, GRIFFITHS H D, et al. Frequency diverse array radars[C]// 2006 IEEE Conference on Radar. Verona, NY, USA: IEEE, 2006: 3. doi:10.1109/RADAR.2006.1631800.
- [5] SAMMARTINO P F, BAKER C J, GRIFFITHS H D. Frequency diverse MIMO techniques for radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(1): 201–222. doi:10.1109/taes.2013.6404099.
- [6] WANG Wenqin. Frequency diverse array antenna: new opportunities[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2015, 57(2): 145–152. doi:10.1109/MAP.2015.2414692.
- [7] LIAO Yi, WANG Wenqin, ZHENG Zhi. Frequency diverse array beam pattern synthesis using symmetrical logarithmic frequency offsets for target indication[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(5): 3505–3509. doi:10.1109/TAP.2019.2900353.
- [8] SHAO Huaizong, DAI Jun, XIONG Jie, et al. Dot-shaped range-angle beam pattern synthesis for frequency diverse array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016(15): 1703–1706. doi:10.1109/LAWP.2016.2527818.
- [9] GUI Ronghua, HUANG Bang, WANG Wenqin, et al. Generalized ambiguity function for FDA radar joint range, angle and Doppler resolution evaluation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020. doi:10.1109/LGRS.2020.3044351.
- [10] 李星星, 熊智敏, 王党卫, 等. 一种改进的FDA-MIMO雷达波束形成算法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020, 18(4): 606–609. (LI Xingxing, XIONG Zhimin, WANG Dangwei, et al. An improved FDA-MIMO radar beamforming algorithm[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2020, 18(4): 606–609.) doi:10.11805/TKYDA2017368.
- [11] LIAO Yi, ZENG Guanghui, WU Chunlin, et al. Frequency diverse array design for deceptive jamming suppression using particle swarm optimization[C]// 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. IEEE, 2021: 2719–2722. doi:10.1109/IGARSS47720.2021.9554788.

- [12] GONG Shiqi, WANG Shuai, CHEN Sheng, et al. Time-invariant joint transmit and receive beam pattern optimization for polarization-subarray based frequency diverse array radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018,66(20):5364-5379. doi:10.1109/TSP.2018.2868041.
- [13] TANG Wengen, HONG Jiang, QI Zhang. Range-angle decoupling and estimation for FDA-MIMO radar via atomic norm minimization and accelerated proximal gradient[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2020(27):366-370. doi:10.1109/LSP.2020.2972470.
- [14] WANG Huake, LIAO Guisheng, XU Jingwei, et al. Space-time matched filter design for interference suppression in coherent frequency diverse array[J]. IET Signal Processing, 2020,14(3):175-181. doi:10.1049/iet-spr.2019.0227.
- [15] LAN L, MARINO A, AUBRY A, et al. GLRT-based adaptive target detection in FDA-MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020,57(1):597-613. doi:10.1109/TAES.2020.3028485.

#### 作者简介:

饶云华(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理. email:ryh@whu.edu.cn.

万显荣(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理.

贺浩(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无源雷达、频率分集.

易建新(1989-), 男, 博士, 特聘研究员, 主要研究方向为无源雷达与雷达信号处理等.

(上接第284页)

- [16] 邓永烈. 低轨 5G 卫星的初始随机接入关键技术研究[D]. 成都:成都理工大学, 2021. (DENG Yonglie. Research on key technologies of initial random access for low orbit 5G satellites[D]. Chengdu, China: Chengdu University of Technology, 2021.) doi:10.26986/d.cnki.gcdlc.2021.001201.
- [17] ZHEN Li, SUN Teng, LU Guangyue, et al. Preamble design and detection for 5G enabled satellite random access[J]. IEEE Access, 2020(8):49873-49884. doi:10.1109/ACCESS.2020.2979871.
- [18] LI Chengmei, BA Hongbo, DUAN Hexiang, et al. A two-step time delay difference estimation method for initial random access in satellite LTE system[C]// The 16th International Conference on Advanced Communication Technology. Pyeongchang, Korea (South):IEEE, 2014:10-13. doi:10.1109/ICACT.2014.6778912.

#### 作者简介:

段相龙(2001-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星移动通信. email:1933074308@qq.com.

苏昭阳(1998-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为卫星通信、无线信道建模等.

刘留(1981-), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要研究方向为无线信道测量与建模、时变信道信号处理、5G关键技术、高铁宽带接入物理层关键技术等.

韩紫杰(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星移动通信等.

周涛(1988-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为通信信号处理、无线信道测量与建模.

尹毅(1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为数字移动通信、调度通信.