

MIMO 雷达目标空间和频率散射多样性研究

周生华 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文利用 2 维圆形散射点模型, 研究了窄带频率和空间分集 MIMO 雷达接收通道中的目标回波的统计特性, 结果表明目标回波信号本身服从高斯分布, 目标回波信号之间的相关系数是等效频率间隔和目标尺寸的函数, 空间分集雷达和频率分集雷达的区别在于等效频率间隔的定义。基于散射点模型的数值试验表明该相关系数是有效的。

关键词: 分集雷达; 散射多样性; MIMO 雷达

中图分类号: TN958.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0038-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01536

Scattering Properties of Spatial and Frequency Diversity of MIMO Radar Targets

Zhou Sheng-hua Liu Hong-wei

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Statistical properties of radar target echoes is researched on narrowband frequency diversity and spatial diversity MIMO radar, with a two-dimensional round shaped scatters model. The results show that target echo in any receiving channel follows a Gaussian distribution and the correlation coefficients between target echoes are functions of the Equivalent Frequency Interval (EFI) and the target size. Spatial diversity and frequency diversity radar are different in the definitions of EFI. Numerical experiment based on scatters model verifies the effectiveness of the correlation coefficients.

Keys words: Diversity radar; Scattering diversity; Multiple Input and Multiple Output (MIMO) radar

1 引言

传统雷达中, 目标在不同姿态下的回波信号起伏较大, 较深的衰落会降低雷达系统的检测性能。提高检测系统稳健性的有效方法是采用分集 MIMO 雷达^[1-6]技术, 它的基本思想是, 在多个分集通道中目标回波同时发生较深衰落的概率较小。为了避免多个分集通道同时陷入目标响应的衰落点, 在设计分集雷达时通常要求, 各个分集接收通道接收的目标回波信号是相互独立的; 独立回波的另一个好处是, 可以利用简单且成熟的非相干积累检测器来融合分集接收通道中的信号。常见分集 MIMO 雷达技术有频率分集^[4], 空间分集^[1-3]等。由于分集通道中目标回波信号之间的相关性与多种因素有关, 例如, 目标尺寸, 目标空间位置等, 它们也是设计分集雷达通道的参数的依据。而对于给定系统参数的雷达系统, 多种因素可能导致分集接收通道中的回

波信号具有一定的相关性, 例如, 目标尺寸过小, 对于频率分集雷达, 频率间隔过小, 对于空间分集雷达, 目标过远等。此时, 我们需要研究相关的目标回波对于非相干积累检测器的检测性能的影响, 而首先我们需要定量的描述这种相关性。

实际上, 目标回波序列之间的相关性是雷达系统中的一个根本性问题, 在很多情况下, 我们假设目标回波序列之间是完全相关或者完全独立的, 其判定准则由目标回波的独立性门限给出, 若为前者则采用相干处理方式, 后者采用非相干处理方式。而这种假设常常偏离实际。对传统雷达, 目标的转动分量会导致目标回波的去相关; 对于频率分集雷达和空间分集雷达, 系统参数与目标尺寸的不恰当会导致目标回波之间的相关性介于完全相关和独立之间。在这些情况下, 简单的独立性门限已经不足以描述雷达目标回波之间复杂的相关性问题, 我们需要一个更加细致的参数来描述这种相关性, 如相关系数。

而相关系数是目标回波的一种统计特性, 可以利用散射点模型^[1-3,5]进行研究。散射点模型是一种

2008-11-24 收到, 2009-10-20 改回

教育部长江学者和创新团队支持计划(IRT0645), 国家自然科学基金(60772140)和国家部委基金资助课题

通信作者: 周生华 shzhou@mail.xidian.edu.cn

常用的描述目标散射特性的数学模型, 它有多种形式, 区别在于散射点模型中散射点的分布, 散射强度, 个数和散射体的形状等。例如, 利用 2 维矩形散射点模型, 文献[2,3]得出了空间分集雷达的目标回波信号之间的独立性条件。但是, 矩形散射点模型的一个特点是, 它产生的目标回波之间的统计特性是空变的, 例如对于频率分集雷达, 当雷达站位于目标的不同的方位时, 由于目标对雷达视线方向的投影长度可能不同, 得到的目标回波信号之间的相关系数可能是不同的, 因此, 利用它不能得到一个与目标方位角无关的相关系数。而圆形的散射点模型产生回波的统计特性与观察目标的角度无关, 利用该模型, 本文对雷达目标的空间散射特性和频率散射特性同时进行了研究, 得到了频率和空间分集接收通道中目标回波信号的统一的相关系数表达式和统一的独立性门限表达式。

2 分集 MIMO 雷达目标回波信号模型

首先建立分集 MIMO 雷达目标回波信号模型。本文采用极坐标系统, 只考虑单个雷达发射机、多个空间分置接收机的情况。图 1 给出了雷达发射机、接收机和雷达目标的空间拓扑结构图。

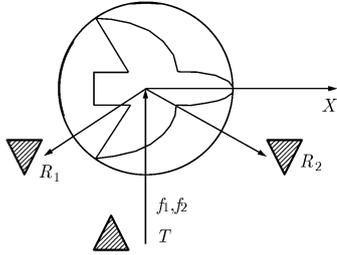


图 1 分集雷达系统拓扑结构图

其中 T 表示雷达发射站, R_1 和 R_2 表示两个空间分置的雷达接收站, f_1 , f_2 表示两个雷达发射信号的载频。假设雷达目标为圆形, 其圆心位于极坐标的原点, 半径为 R , 由大量的散射特性相互统计独立的散射点组成, 且在 (r, ϕ) 点的散射强度满足 $\kappa(r, \phi) = \sum_{l=1}^P w_l \delta(r - r_l) \delta(\phi - \phi_l) r$, 其中 p 表示散射点的个数, w_l 表示第 l 个散射点的散射强度, 所有散射点的散射强度相互独立且服从均值为 0 的复高斯分布, 即 $E[\kappa(r, \phi)] = 0$, 同时, 根据散射点模型:

$$E(\kappa(r, \phi) \cdot r \cdot \kappa^*(\gamma, \varphi) \cdot \gamma) = \frac{1}{\pi R^2} \delta(r - \gamma) \cdot \delta(\phi - \varphi) \cdot r \quad (1)$$

假设雷达发射机的位置为 (u, α) , 发射载频为 f_m 的单频窄带信号 $s_m(t)$, $m = 1, 2, \dots, M$, 雷达接收机的位置为 (v_k, β_k) , $k = 1, 2, \dots, L$, 其中, M 表示发

射窄带信号的可用载频的个数, L 表示雷达接收机的个数, 每个雷达接收机均可处理雷达发射机发射的各种信号。若雷达发射机发射第 m 个窄带信号, 第 i 个雷达接收机接收到的回波信号可表示为

$$r_{mi}(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^R \sqrt{E_{mi}} s_m[t - \tau(u, \alpha, r, \phi) - \tau(v_k, \beta_k, r, \phi)] \kappa(r, \phi) r dr d\phi + n_{mi} \quad (2)$$

其中 $\tau(u, \alpha, r, \phi) = \sqrt{u^2 + r^2 - 2ur \cos(\alpha - \phi)}/c$ 表示电磁波从点 (u, α) 到点 (r, ϕ) 的传播时间, c 表示光速, n_{mi} 表示接收通道中的干扰、杂波和噪声等余项, E_{mi} 表示接收通道的目标回波信号功率的期望。假设, 相对于目标, 发射站和接收站均位于远场, 即 $u \ll r$, 此时有 $\tau(u, \alpha, r, \phi) - \tau(u, \alpha, 0, 0) \approx -r \cdot \cos(\phi - \alpha)/c$, 因为 $s_m(t)$ 是窄带信号, 可得

$$r_{mi}(t) = \sqrt{E_{mi}} \eta_{mi} s_m(t - u/c - v_k/c) + n_{mi}, \quad i=1, 2, \dots, L \quad (3)$$

其中

$$\eta_{mi} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \exp\{j2\pi f_m r [\cos(\phi - \alpha) + \cos(\phi - \beta_i)]/c\} \cdot \kappa(r, \phi) r dr d\phi \quad (4)$$

表示目标回波信号的起伏分量, 它是大量的高斯随机变量的和, 根据大数定理, η_{mi} 服从高斯分布, 其均值和方差为

$$\left. \begin{aligned} E(\eta_{mi}) &= \int_0^{2\pi} \int_0^R \exp[j2\pi f_m r (\cos(\phi - \alpha) + \cos(\phi - \beta_i))/c] \cdot E[\kappa(r, \phi)] r dr d\phi = 0 \\ D(\eta_{mi}) &= E(\eta_{mi}^2) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R r dr d\phi = 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

实际上, η_{mi} 是归一化的随机变量, 这种归一化有利于目标回波之间相关系数的推导。

描述目标的模型决定了回波信号概率分布的结论, 利用散射点模型, 本文得到目标回波信号服从复高斯分布。对于具有特定结构的散射点模型, 其回波信号可能服从复高斯^[5]或其他分布。与散射点模型不同, 计算电磁学方法研究的是特定目标对于特定信号的准确响应, 它通常不考虑目标回波信号的统计特性, 而统计特性对于检测器的设计和分析是有用的。

3 空间和频率分集接收通道中目标回波信号的相关性

受到电磁波的照射, 雷达目标表现为空间散射多样性和频率散射多样性, 从而目标回波序列之间的相关性分为频率相关性和空间相关性, 前者反映了目标对于不同载频的窄带信号的响应之间的关系, 如 η_{mk} 与 $\eta_{m'k}$ 之间的相关性, 后者反映了目标对

于不同空间位置处、相同载频窄带信号的响应之间的相关性,如 η_{mk} 与 $\eta_{m'k'}$ 之间的相关性,其中 $m \neq m'$, $k \neq k'$ 。下面分别对这两种目标回波间的相关性进行研究。

在给出空间和频率分集通道内目标回波信号的相关系数之前,先给出一个公式:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[j\mu r \sin(\varphi)] r dr d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[j\mu r \cos(\varphi)] r dr d\varphi = J_0(\mu) + J_2(\mu) \quad (6)$$

其中 $J_0(\cdot)$ 、 $J_2(\cdot)$ 分别表示0阶和2阶贝塞尔函数^[7],证明参考附录。利用式(6)可以方便地得到空间和频率分集通道中目标回波信号之间的相关系数。

3.1 空间分集接收通道中目标回波信号之间的相关性

对于目标回波的空间相关性,由式(5)知, $\eta_{mk} \sim N(0,1)$, $\eta_{m'k'} \sim N(0,1)$,其中 $N(0,1)$ 表示均值为0方差为1的复高斯分布,因此,第 k 和第 k' 个雷达接收机的第 m 个接收通道中目标回波信号之间的相关系数为

$$\rho = E(\eta_{mk}\eta_{m'k'}^*) = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^R dr d\phi d\gamma d\varphi \cdot \exp\{j2\pi f_m [r \cos(\phi - \beta_k) - \gamma \cos(\varphi - \beta_{k'})]/c\} \cdot E[r\kappa(r, \phi)\gamma\kappa^*(\gamma, \varphi)]$$

根据式(1),可得

$$\rho = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \exp\{j2\pi f_m r [\cos(\varphi - \beta_k) - \cos(\varphi - \beta_{k'})]/c\} r dr d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp\left[j4\pi f_m R r \sin\left(\frac{\beta_k - \beta_{k'}}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\varphi - \beta_k - \beta_{k'}}{2}\right)/c\right] r dr d\varphi \quad (7)$$

利用式(6),可得

$$\rho = J_0(2\pi f_e d/c) + J_2(2\pi f_e d/c) \quad (8)$$

其中 $d = 2R$ 表示目标的投影长度, f_e 表示等效频率间隔,空间分集通道的等效频率间隔的定义为

$$f_e = f_m \sin\left(\frac{\beta_k - \beta_{k'}}{2}\right) \quad (9)$$

从式(8)和式(9)可以看出,空间分集通道内目标回波之间的相关系数是通道工作频率 f_m ,目标长度 d 和两个接收站的极角差的函数。

从式(9)可以看出,当目标对两座雷达接收站的方位角相同时,即 $\beta_k = \beta_{k'}$, $\rho = 1$,表示目标回波信号完全相关,这是因为此时两个接收站接收到的目标回波信号的起伏分量是完全相同的,而在相位

上相差一个由两座雷达站之间的距离和雷达信号的波长决定的相位。

3.2 频率分集接收通道中目标回波信号之间的相关性

对于目标的频率相关性,根据 $\eta_{mk} \sim N(0,1)$, $\eta_{m'k'} \sim N(0,1)$,第 k 个接收站中第 m 和第 m' 个接收通道中目标回波之间的相关系数可写为

$$\rho = E(\eta_{mk}\eta_{m'k'}^*) = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^R dr d\phi d\gamma d\varphi \cdot E[r\kappa(r, \phi)\gamma\kappa^*(\gamma, \varphi)] \exp\{j2\pi [f_m r \cos(\phi - \alpha) + f_m r \cos(\phi - \beta_k) - f_m' r \cos(\phi - \alpha) - f_m' r \cos(\phi - \beta_{k'})]/c\}$$

根据式(1),可得

$$\rho = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \exp\{j2\pi (f_m - f_m') r [\cos(\varphi - \alpha) + \cos(\varphi - \beta_k) - \cos(\varphi - \beta_{k'})]/c\} r dr d\varphi = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp\left[j4\pi (f_m - f_m') R r \cos\left(\frac{\alpha - \beta_k}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\varphi - \alpha - \beta_{k'}}{2}\right)/c\right] r dr d\varphi \quad (10)$$

根据式(6),可得

$$\rho = J_0(2\pi f_e d/c) + J_2(2\pi f_e d/c) \quad (11)$$

其中 $d = 2R$ 表示目标投影长度,频率分集雷达系统的等效频率间隔定义为

$$f_e = (f_m - f_m') \cos\left(\frac{\alpha - \beta_k}{2}\right) \quad (12)$$

从式(11)和式(12)可以看出,收发分置的频率分集雷达的频率分集接收通道中目标回波信号之间的相关系数是两个通道工作频率差,雷达发射机和接收机的极角之差和目标投影长度的函数。

根据式(12),若 $\alpha - \beta_k = \pi$,可以得到 $\rho = 1$,说明目标回波信号之间是完全相关的。这是因为,此时目标位于雷达发射站和接收站之间的线段上,在任何频率照射下,对所有散射点,从雷达发射站到散射点到雷达接收站的波程差都相同。

当雷达发射机与雷达接收机同置,即 $\alpha = \beta_k$ 时,也就是传统的单站频率分集雷达,根据式(12),等效频率间隔定义为

$$f_e = f_m - f_m' \quad (13)$$

可以看出,对于给定尺寸的雷达目标,不同于空间分集雷达和收发分置的频率分集雷达,单站频率分集雷达的分集接收通道内目标回波信号之间的相关系数是常数,它与目标出现的位置无关。

已知利用不同载频的窄带信号观测目标时,随着频率间隔的增大,得到的目标回波信号趋向于独

立; 同样, 从不同的角度观测目标时, 随着角度间隔的增大, 得到的目标回波信号亦趋于独立, 从式(8)和式(11)可以看出, 它们的这种趋向于独立的过程对频率分集雷达和空间分集雷达来说是一致的, 而等效频率间隔则给出了表示这个过程快慢程度的量。需要指出的是, 这种独立于目标方位角的变化规律不能通过矩形散射点模型得到, 其原因是, 随着对目标视角的变化, 目标的投影长度是变化的。

3.3 目标回波独立性条件

对于分集 MIMO 雷达, 通常以非相干的方式积累分集接收通道内的信号以检测雷达目标, 相关的目标回波信号可能会降低非相干积累检测器的检测性能, 因此, 通常要求其分集接收通道中目标回波信号之间是去相关的。类似于^[1,2], 根据式(7)和式(10), 若相关系数趋向于 0, 其相位项需要至少旋转一周, 可令其指数项大于 2π , 此时空间和频率分集接收通道内目标回波之间相互独立的条件为

$$f_c d / c > 1 \quad (14)$$

需要指出的是, 与相关系数相似, 这也是一个统一的表达形式, 代入式(12)或者式(13)可以分别得到空间分集接收通道, 收发分置和收发同置频率分集接收通道中目标回波的独立性条件。特别地, 对空间分集雷达, 将式(9)代入式(14), 可得目标回波信号的独立性条件为

$$\left| \sin \left(\frac{\beta_k - \beta_{k'}}{2} \right) \right| \geq \frac{\lambda}{d} \quad (15)$$

假设雷达目标位于远场, 且目标位于两座雷达接收站的垂直平分线上时, 文献[3]给出的空间分集接收通道中目标回波信号之间的独立性条件为

$$d_i / R \geq \lambda / d \quad (16)$$

其中 R 表示目标与雷达接收站之间的距离。若目标位于两座雷达接收站的垂直平分线上, 且 $d_i / R \ll 1$, 此时有 $d_i / R \approx 2 \sin \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{2} \right)$, 式(15)和式(16)

除常数项外是一致的, 该常数项的大小反应了独立性门限的松紧。若 $\lambda / d > 1$, 根据式(15), 独立性条件将不能获得满足, 即独立的目标回波不能得到; 进一步, 若 $\lambda / d \gg 1$, 此时目标可看作是一个点目标, 而分集通道中目标回波信号之间可以看作是完全相关的。

利用分集技术, 通过接收多路相互独立的目标回波, 可以提高雷达系统的检测性能^[1,2], 而本文对于空间分集雷达和频率分集雷达的分析表明, 雷达目标的空间相关性和频率相关性是一致的, 它们有统一的相关系数表达式和统一的独立性条件, 且服从从均值为 0 的复高斯分布, 因此, 空间分集雷达

和频率分集雷达均可以等效的通过分集技术提高雷达系统的检测性能。

值得说明的是, 散射点模型是一个描述电磁波目标的一个近似模型, 它是利用最为随机的模型来描述实际雷达目标, 大量目标的散射特征和散射点模型相近。

4 仿真结果

上文得到了频率分集雷达和空间分集雷达的分集接收通道中的目标回波信号之间的相关系数的理论表达式, 下面将通过数据仿真的方法对该相关系数进行验证, 数值试验的过程如下。

(1) 在某一圆形区域内均匀地产生多个散射点用以代表雷达目标, 本试验中, 圆形区域的直径为 10 m, 设圆心位于原点, 产生的散射点的个数为 2777 个;

(2) 根据圆形区域的大小, 选择恰当的初始载频, 等效频率间隔的变化范围和采样个数, 本试验中, 载频为 $f=1$ GHz, 等效频率间隔的变化范围是 0–95 MHz, 100 个等效频率间隔采样点;

(3) 根据等效频率间隔的采样间隔 Δf , 对频率分集方式, 根据式(13)得到载频间隔, 亦为 Δf ; 对于空间分集方式, 根据式(9)计算雷达目标方位角的采样间隔 $\Delta \beta$;

(4) 对于第 i 个等效频率间隔采样点, 为了得到更多样本, 将目标的方位角 θ 从 0° 到 180° 分割成 K 份, 在每个方位角度 θ_k , 计算并存储目标对于载频为 f 和 $f+i\Delta f$ 的窄带信号的响应, 分别存储于矩阵 \mathbf{P} 的第 1, 2 列; 雷达发射机的方位角固定为 $\alpha=0^\circ$, 对于载频为 f 的窄带信号, 计算并存储方位角分别为 β 和 $\beta+i\Delta\beta$ 的两座雷达接收机接收到的目标信号, 分别存储于矩阵 \mathbf{P} 的第 3, 4 列, 这里 $K=5000$ 次, 计算时假设雷达接收机已补偿通道中由于雷达到目标的距离引起的相位项, 这等效于所有的雷达站均位于目标的某一等距离环上;

(5) 在该等效频率间隔采样点上, 根据式(17)估计频率相关系数和空间相关系数:

$$\left. \begin{aligned} \text{频率分集: } \rho_i &= \frac{\operatorname{Re} \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{P}(k,1) \mathbf{P}^*(k,2) \right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K |\mathbf{P}(k,1)|^2 \sum_{k=1}^K |\mathbf{P}(k,2)|^2}} \\ \text{空间分集: } \rho_i &= \frac{\operatorname{Re} \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{P}(k,3) \mathbf{P}^*(k,4) \right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^K |\mathbf{P}(k,3)|^2 \sum_{k=1}^K |\mathbf{P}(k,4)|^2}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

根据以上步骤, 得到图 2 所示曲线。仿真得到

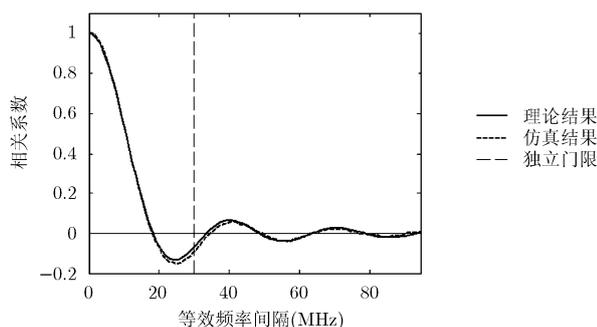


图 2 两路通道中目标回波相关系数随等效频率间隔变化图

的雷达空间和频率的相关系数曲线均与理论结果较好地重合, 这里只是给出空间相关系数曲线。其中虚线表示利用式(14)得到的目标回波之间的独立性门限, 此时目标回波信号之间的相关系数为 -0.0676 。在理论推导过程中, 实际上散射点的个数可以无穷多, 但是, 在仿真试验中, 我们只能采用有限的散射点个数, 同时由于实验次数有限, 因此理论曲线和仿真曲线存在些许偏差。总体讲, 从图 2 可以看出, 理论曲线和仿真曲线重合度较好, 因此式(8)和式(11)是有效的。

研究还发现, 改变雷达发射机的方位角 α 不影响实验结果, 这与式(9)是一致的, 此时雷达目标的相关性是独立于雷达发射机的方位角的; 同时, 改变实验中的初始频率 f 亦不影响实验结果, 这是因为等效频率间隔是空间分集雷达和频率分集雷达共同的去相关尺度的缘故。由于这些实验的结果均与图 2 几乎完全相似, 这里省略以节省空间。

5 结束语

利用散射点模型, 本文讨论了空间和频率分集 MIMO 雷达系统的分集通道中目标回波信号的相关性与雷达系统配置参数的关系, 得到了统一的目标回波信号之间的相关系数表达式和独立性条件, 并且通过数值仿真的方法对结果进行了验证。如何利用该相关系数以及目标回波的信噪比进行目标检测仍然需要进一步的研究, 将作为以后的研究内容。

附录 式(6)的证明

根据正弦余弦函数的周期性可知第 1 个等式显然成立, 下面证明第 2 个等式:

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[j\mu r \cos(\varphi)] r dr d\varphi \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 r \cos[\mu r \cos(\varphi)] + jr \sin[\mu r \cos(\varphi)] dr d\varphi \end{aligned}$$

第 2 个积分函数为奇函数, 可得

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 r \cos[\mu r \cos(\varphi)] dr d\varphi \\ &= \frac{1}{\pi} \oint_{x^2+y^2 \leq 1} \cos[\mu x] dx dy \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \cos[\mu x] dx \int_{-\sqrt{1-x^2}}^{\sqrt{1-x^2}} dy \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 2\sqrt{1-x^2} \cos(\mu x) dx \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin^2(\varphi) \cos[\mu \cos(\varphi)] d\varphi \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [1 - \cos(2\varphi)] \cos[\mu \cos(\varphi)] d\varphi \end{aligned}$$

利用 Bessel 函数的性质^[7]可得 $J = J_0(\mu) + J_2(\mu)$ 。

证毕

参考文献

- [1] Haimovich A M, Blum R S, and Cimini L J. MIMO radar with widely separated antennas [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(1): 116-129.
- [2] Fishler E, Haimovich A, and Blum R S, et al. Spatial diversity in radars-models and detection performance [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(3): 823-838.
- [3] Fishler E, Haimovich A, and Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]. Proc. IEEE Radar Conf. Philadelphia, PA, April 2004: 71-78.
- [4] Vannicola V. Detection of slow fluctuating targets with frequency diversity channels [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, AES-10(1): 43-52.
- [5] Swerling P. Probability of detection for fluctuating targets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1960, 6(2): 269-308.
- [6] 王敦勇, 马晓岩, 袁俊全, 等. 两种基于 MIMO 雷达体制的鲁棒 CFAR 检测器[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 596-600. Wang Dun-yong, Ma Xiao-yan, and Yuan Jun-quan, et al. Two kinds of robust CFAR detector based on MIMO radar system [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(3): 596-600.
- [7] Watson G N. A Treatise on the Theory of Bessel Functions [M]. 2nd ed. Cambridge mathematical library. 1995, Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press. vi, 804 p.

周生华: 男, 1982 年生, 博士生, 从事 MIMO 雷达、目标检测、雷达目标参数估计方面的研究。

刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室主任, 从事雷达信号处理、目标识别、新体制雷达等方面的研究。