

## 多子阵平板天线峰值旁瓣优化

张峰干<sup>1,2</sup>, 井亚鹤<sup>1</sup>, 肖磊<sup>3</sup>, 周淑华<sup>1</sup>

(1. 第二炮兵工程大学, 西安 710025; 2. 中国人民解放军96263部队, 河南 洛阳 471003;  
3. 中国人民解放军96656部队, 北京 102208)

**摘要:** 针对多子阵平板天线离散口径带来的高旁瓣问题, 分析了不同仰角下的峰值旁瓣电平成因, 提出了降低多子阵天线峰值旁瓣电平的方法。以降低工作范围内的峰值旁瓣为目标, 采用遗传算法研究了天线口径、阵元方向性、幅度衰减等因素对多子阵天线的影响, 实现了峰值旁瓣的最佳优化。仿真结果表明, 多子阵天线的方向图综合仅需考虑最小间距约束; 除子阵间距外, 阵元方向性和幅度衰减对多子阵天线的优化也有一定的影响, 在优化过程中需综合考虑, 本文方法与分析结果可为多子阵平板天线的设计提供参考。

**关键词:** 多子阵平板天线; 间距优化; 峰值旁瓣; 天线口径; 幅度衰减

中图分类号: V271.4; TN820.1 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2014)01-0086-05

## Peak Sidelobe Optimization for Planar Antenna with Multiple Subarrays

ZHANG Feng-gan<sup>1,2</sup>, JING Ya-que<sup>1</sup>, XIAO Lei<sup>3</sup>, ZHOU Shu-hua<sup>1</sup>

(1. The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;  
2. No. 96263 Unit of PLA, Luoyang 471003, China; 3. No. 96656 Unit of PLA, Beijing 102208, China)

**Abstract:** The sidelobes of the planar antenna with multiple subarrays (MSPA) are caused due to its dispersed aperture. This paper analyzes the factors of peak sidelobes level forming for the antenna at different elevation angles and proposes some suppression methods. In order to reduce the peak sidelobe level of the MSPA in the working range, the effect of the antenna aperture, element directivity and amplitude attenuation are studied by using genetic algorithm, and the peak sidelobe optimization is realized. The simulation results show that the integration of the MSPA orientation diagram needs only to consider the minimum subarray spacing constraint. Furthermore, the element directivity and amplitude attenuation should be also taken into account in the optimization process. The methods and results can be used as a reference to the MSPA design.

**Key words:** planar antenna with multiple subarrays; spacing optimization; peak sidelobe level; antenna aperture; amplitude attenuation

### 0 引言

近年来,随着阵列天线技术的迅猛发展,应用于不同领域的天线阵列层出不穷,为实现高速率的车载卫星通信,多子阵平板天线技术在宽带卫星移动通信领域得到了广泛的应用<sup>[1-7]</sup>。作为一种新型的阵列天线,多子阵天线与传统的反射面天线和纯相控阵天线相比,在降低天线安装高度、改善相控阵天线低仰角时

的性能、与各种类型载体的集成性等方面都具有明显的优势,并有多款天线产品已出现在国外的军事、民用宽带卫星移动通信市场<sup>[1-2,8-9]</sup>。然而,国内对多子阵平板天线的研究还处于起步阶段,对小型、轻便、低成本的多子阵天线仍未有样机的相关报告。多子阵平板天线在宽带卫星移动通信领域的巨大优势,使其在军事通信、应急指挥、远程医疗、新闻实时采集等方面受到了许多政府和研究机构的高度重视<sup>[8-11]</sup>。

在宽带卫星移动通信中,多子阵技术是降低车载天线高度和改善平板天线低仰角性能的常见方法,然而由于多子阵平板天线的离散口径,其天线方向图中的旁瓣电平较高,对于间距固定多子阵平板天线更是

收稿日期:2012-12-22 修回日期:2013-01-29

基金项目:国家自然科学基金(61179004)

作者简介:张峰干(1985—),男,河南宜阳人,博士生,助工,研究方向为宽带卫星移动通信,阵列信号处理。

如此<sup>[4-7]</sup>。近年来,许多进化算法已广泛应用于阵列天线的设计与优化中,并成功地实现了阵列天线峰值旁瓣优化、零陷生成、方向图赋形等<sup>[12-13]</sup>,然而关于多子阵平板天线优化的文献却很少。本文以降低多子阵天线的峰值旁瓣为目标,通过分析多子阵平板天线的方向图特性,讨论了不同仰角下的峰值旁瓣成因,并采用遗传算法分析了天线口径、阵元方向性、幅度衰减等因素对降低峰值旁瓣电平的影响。

### 1 多子阵平板天线

多子阵技术,即把原来整块的平板天线分成几个较小的子天线,以减小单个天线板宽度,实现天线的低轮廓,分板后的天线称为多子阵平板天线。这种将较大平板天线“切割”成较小天线阵的技术可以有效降低天线的高度,如果把平板天线分成  $Q$  个子阵,则天线的高度可降为原来的  $1/Q^{[1-4]}$ 。

国内对多子阵天线的研究起步较晚,目前还没有成熟的多子阵天线产品面世,根据国外现有的多子阵平板天线结构,本文重点研究固定不等间距的多子阵天线。该类天线的子阵按照优化好的间距排布,工作过程中子阵位置不变,仰角由天线机械伺服系统或电子波控系统调整,其结构简单、造价较低,相关技术和方法也很容易推广到其他类型的多子阵天线<sup>[8-9]</sup>。

#### 1.1 天线结构

多子阵平板天线的结构如图 1 所示,各子阵固定于基座,基座在电机的带动下可实现波束方位  $0^\circ \sim 360^\circ$  的连续转动,俯仰维的调整可通过电机或馈相网络实现。

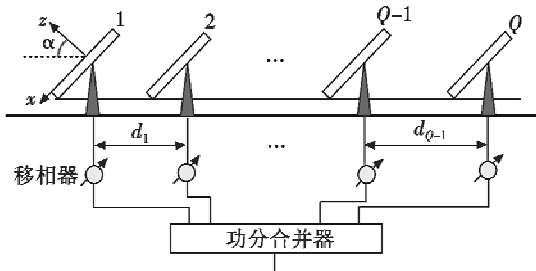


图 1 多子阵平板天线

Fig.1 The structure of the planar antenna with multiple subarrays

图中: $Q$  为子阵个数; $q = 1, 2, \dots, Q$ , 为子阵的序号; $d_i (i = 1, 2, \dots, Q - 1)$  为子阵间距;平板天线的波束方向为其法线,若天线对准卫星,则图中  $\alpha$  称为对星仰角。

建立如图 2 所示的阵面坐标系  $o-xyz$ ,该坐标系与子阵固连; $x$  轴沿子阵宽方向; $y$  轴沿子阵长方向,与转台平面平行; $z$  轴垂直于子阵板平面,与  $x, y$  轴构成直角坐标系。多子阵平板天线的方向图由各子阵的天线方向图合成得到,卫星信号在子阵之间形成的空间相位差由移相网络进行补偿。

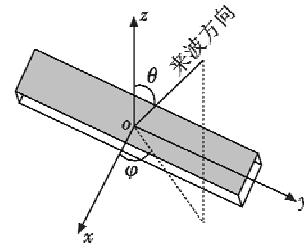


图 2 子阵阵面坐标系

Fig.2 The array coordinate system of the subarray

假设各子阵的天线方向图函数是相同的,则多子阵平板天线的方向图可表示为

$$F(\theta, \varphi, \alpha) = f(\theta, \varphi) \left\{ c_1 + \sum_{q=2}^Q c_q \exp(j(\Phi_q - \phi_q(\theta, \varphi, \alpha))) \right\} \quad (1)$$

式中: $f(\theta, \varphi)$  为子阵方向图; $c_q$  为第  $q$  子阵的幅度加权; $\Phi_q$  为移相器输出; $\phi_q(\theta, \varphi, \alpha)$  为第  $q$  子阵与第 1 子阵的空间相位差,根据几何关系可得<sup>[4,6-7]</sup>

$$\phi_q(\theta, \varphi, \alpha) = -k(\sin \alpha \sin \theta \cos \varphi + \cos \alpha \cos \theta) \times \sum_{i=2}^q d_{i-1}, q = 2, 3, \dots, Q \quad (2)$$

由于多子阵平板天线方位维的方向图与单板天线相同,因此仅对其俯仰维的方向图进行优化研究,即  $\varphi = 0$ 。

#### 1.2 天线方向图分析

为研究多子阵平板天线的方向图特性,现基于方向图乘积原理对均匀间距时的天线方向图进行分析。仿真条件:天线对星仰角  $\alpha = 60^\circ$ ,阵元方向性  $e(\theta, \varphi) = 1$ ,每个子阵在板宽方向(即图 4 中的  $x$  方向)上的阵元数  $N = 4$ ,阵元在  $x$  方向上的间距  $d_x = 12 \text{ mm}$ ,子阵数量  $Q = 8$ ,子阵幅度加权  $c_q = 1 (q = 1, 2, \dots, Q)$ ,相邻子阵间距  $d_i = 85.7 \text{ mm} (i = 1, 2, \dots, 7)$ ,波长  $\lambda = 24 \text{ mm}$ ,天线方向图扫描间距  $\text{step}$  为  $0.1^\circ$ 。为便于进行理论分析,采用理想化的仿真条件,忽略阵元互耦、载体平台散射等因素的影响,仿真结果如图 3 所示。

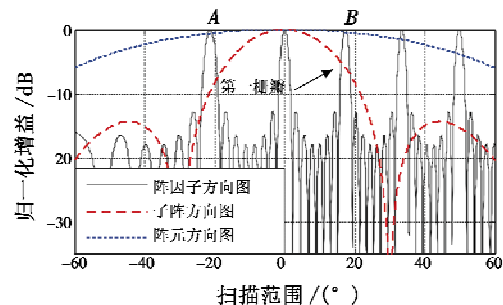


图 3 天线的阵因子方向图和子阵方向图

Fig.3 The subarray pattern and array factor of the multi-subarray antenna

根据方向图乘积原理,合成后的方向图实为图 3 中 3 条曲线在各角度上归一化增益值的简单相加。显

然,此时合成后的多子阵天线峰值旁瓣(Peak Sidelobe Level,PSLL)会出现在  $B$  处,主要由第一栅瓣(与主瓣距离最近的栅瓣)引起。

图4为多子阵天线第一栅瓣位置随天线扫描仰角的变化情况,由图可知,第一栅瓣随扫描仰角的增大而不断地靠近主瓣,其对峰值旁瓣的影响也越来越严重。在文献[4]的优化间距下,扫描角为  $20^\circ$  和  $70^\circ$  时的天线方向图如图5、图6所示。

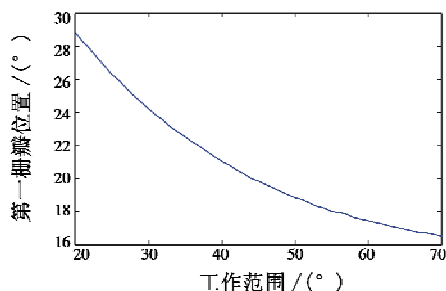


图4 多子阵天线第一栅瓣位置

Fig. 4 The position of the first grating lobe in the pattern of the multi-subarray antenna

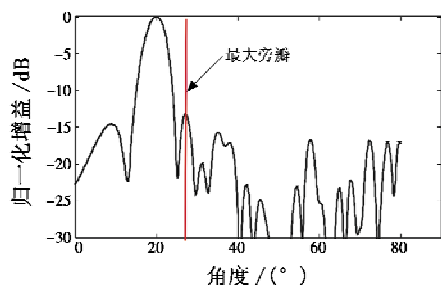


图5  $\alpha = 20^\circ$  倾角下的优化方向图

Fig. 5 The antenna optimizing pattern when  $\alpha = 20^\circ$

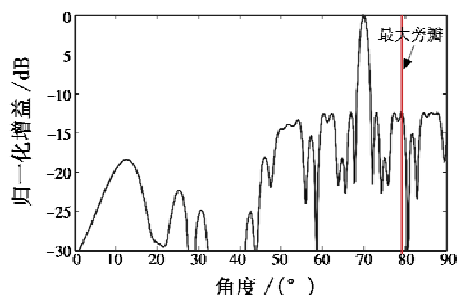


图6  $\alpha = 70^\circ$  倾角下的优化方向图

Fig. 6 The antenna optimizing pattern when  $\alpha = 70^\circ$

由图5可知,低仰角时的最大旁瓣电平主要由第一旁瓣产生,阵因子方向图栅瓣的影响较小,且峰值旁瓣电平较低;而高仰角下的最大旁瓣电平则主要由阵因子方向图的第一栅瓣引起,如图6所示,其峰值旁瓣电平较大。

针对多子阵天线  $\alpha \in [20^\circ, 70^\circ]$  的工作范围<sup>[4,6-7]</sup>,可重点优化高仰角下的峰值旁瓣。为改善多子阵天线性能,可分别从阵因子方向图的栅瓣和旁瓣两个角度着手:1)改变栅瓣的位置,使得栅瓣尽可能地远离主瓣或

处于子阵方向图的零点位置以实现低旁瓣的要求,该方法需要对子阵间距以及天线口径等因素进行优化;2)采用幅度衰减器——对子阵进行幅度加权(也称为不等幅馈电技术)来降低除栅瓣外的旁瓣电平;3)采用高增益的阵元,使得子阵方向图的主瓣尽可能的窄。方法1)和3)在文献[4]中已进行了研究,但所得到的结论与本文不同,详细内容将在下文进行分析。

## 2 多子阵平板天线优化

根据多子阵天线的优化目标,本节采用遗传算法分析了天线口径、阵元方向性、幅度加权等因素对多子阵天线优化的影响,实现了多子阵天线峰值旁瓣的最佳优化。

### 2.1 优化目标

根据前文分析,为降低天线的峰值旁瓣,需要对多子阵天线中的子阵间距、幅度加权进行优化。在优化过程中,为防止前后子阵间相互遮挡,影响天线增益,子阵间距应不小于最小值  $d_{\min}$ ,此称为取值约束。另外,部分文献中还对天线口径也进行了约束,在子阵间距和  $D$  固定的情况下进行优化,此称为口径约束<sup>[4-7]</sup>,因此优化目标为

$$\begin{aligned} \min & |S(d_1, d_2, \dots, d_{Q-1}, c_1, c_2, \dots, c_Q)| \quad (3) \\ \text{s.t.} & S(d_1, d_2, \dots, d_{Q-1}, c_1, c_2, \dots, c_Q) = \max_{\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]} (PSLL(\alpha)); \\ & d_q \geq d_{\min}, q = 1, 2, \dots, Q-1; \sum_{q=1}^{Q-1} d_q = D. \end{aligned}$$

即以工作范围  $\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$  内的最大峰值旁瓣达到最小为优化目标。

### 2.2 间距优化

多子阵天线阵因子方向图中的栅瓣位置主要由子阵间距决定,而常规的幅相加权方法对其影响不大。文献[4]采用遗传算法在有口径约束的条件下对多子阵天线的子阵间距进行了优化,得到了比均匀间距更低的峰值旁瓣。实际上,在无口径约束的条件下,多子阵天线的峰值旁瓣会更低,且能够获得更佳的天线性能。更改式(3)中的约束条件,设计优化目标如下

$$\begin{aligned} \min & |S(d_1, d_2, \dots, d_{Q-1})| \quad (4) \\ \text{s.t.} & S(d_1, d_2, \dots, d_{Q-1}) = \max_{\alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]} (PSLL(\alpha)); \\ & d_i \geq d_{\min}, i = 1, 2, \dots, Q-1. \end{aligned}$$

设置子阵最小间距  $d_{\min} = 64.8 \text{ mm}$ <sup>[4,7]</sup>,其他条件与2.1小节相同,按照式(4)进行多子阵的峰值旁瓣优化,得到的子阵最佳间距从  $d_1$  到  $d_7$  分别为123.77 mm、67.98 mm、64.80 mm、64.80 mm、73.33 mm、98.07 mm、64.80 mm,对应的天线口径  $D = 557.6 \text{ mm}$ ,工作范围内的最大峰值旁瓣为  $-12.775 \text{ dB}$ ,比文献[4]中固定口径条件下的优化结果低0.27 dB,且该天线口径更小,更适

合运动载体的安装。

实际上,多子阵天线的子阵间距越大,第一栅瓣距离主瓣越近,综合方向图中的峰值旁瓣相应地也会升高。因此,即使没有口径约束,在优化过程中子阵间距也不会变得很大;相反,为实现较低峰值旁瓣的目标,子阵间距会尽可能地小,以至于出现取最小间距的情况。

图 7 为多子阵天线在带口径约束和不带口径约束条件下的半功率波束宽度。由于天线口径减小,多子阵天线的波束宽度变大(最大增量小于  $1^\circ$ ),但其对卫星移动通信系统的影响不大,且宽波束更有利于多子阵天线的指向跟踪与对准,因此,对多子阵天线子阵间距的优化可以完全不考虑天线口径的影响。另外,8 子阵天线在  $d_{\min} = 64.8 \text{ mm}$  条件下优化的最佳口径  $D = 557.6 \text{ mm}$ ,也就是说,当子阵数目一定时,多子阵天线对应着一个最佳的天线口径,这种对应关系可为多子阵天线的优化设计提供参考。

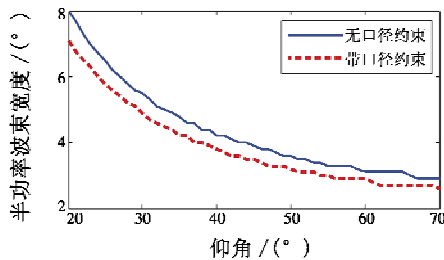


图 7 多子阵天线波束宽度变化

Fig. 7 The 3 dB beamwidth of the multi-subarray antenna

### 2.3 幅度加权与阵元方向性的影响

由图 6 可知,高仰角下的峰值旁瓣没有出现在阵因子方向图的栅瓣位置,而是出现在由栅瓣引起的旁瓣位置上,因此,采用幅度衰减器,也就是幅度加权的方法也能够降低多子阵天线的峰值旁瓣电平,尤其是对低仰角下的天线性能改善更明显。图 8 为子阵间距、幅度加权的优化结果。仿真条件如下: $L_1$  为  $e(\theta, \varphi) = 1, D = \sum_{i=1}^{Q-1} d_i = 600 \text{ mm}$ ;  $L_2$  为  $e(\theta, \varphi) = \cos \theta, D = \sum_{i=1}^{Q-1} d_i = 600 \text{ mm}$ ;  $L_3$  为  $e(\theta, \varphi) = \cos \theta$ ;其他条件与 2.2 小节相同。

实验  $L_1, L_2, L_3$  在整个工作范围内的最大峰值旁瓣电平分别为  $-12.81 \text{ dB}, -13.29 \text{ dB}$  和  $-14.22 \text{ dB}$ ,上述实验结果均优于文献[4]中的幅度加权结果。对比实验  $L_1, L_2$  以及文献[4]中的间距优化结果可知,幅度加权和阵元方向性对峰值旁瓣电平的优化有一定的影响,且阵元方向性对低仰角下的性能改善较大,可达  $3.5 \text{ dB}$ 。实验  $L_3$  优化的子阵间距从  $d_1$  到  $d_7$  分别为  $102.06 \text{ mm}, 104.53 \text{ mm}, 66.28 \text{ mm}, 64.80 \text{ mm}, 64.80 \text{ mm}, 64.80 \text{ mm}, 64.80 \text{ mm}$ ,各子阵的归一化最优幅度加权值从  $c_1$  到  $c_8$  分别为  $0.0625, 0.2018, 0.0776, 0.1627,$

$0.1690, 0.1518, 0.1081, 0.0665$ ;优化结果与文献[4]中在相同子阵数量下的最优结果相比,工作范围内的最大峰值旁瓣电平下降了  $1.72 \text{ dB}$ 。

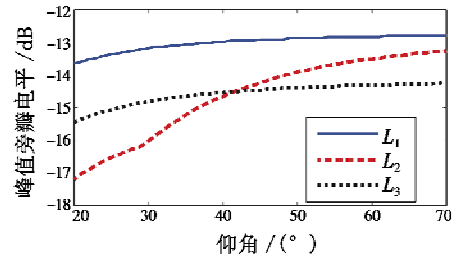


图 8 子阵间距、幅度加权优化结果

Fig. 8 The PSLL by the subarray distance and amplitude optimization

文献[4]分析阵元方向性、幅度加权的影响是在优化后的间距下进行的,但对比上述实验结果可知,阵元方向性、幅度加权对子阵间距的优化都有一定的影响,多子阵天线需要在上述诸因素的综合作用下进行优化才能实现最佳的峰值旁瓣,这与文献[4]中的结论相反。

综上所述,为防止前后子阵间相互遮挡,多子阵天线的方向图综合仅需考虑最小间距约束,而天线的最佳口径与子阵数量有关,两者的对应关系可为多子阵天线的设计提供参考;阵元方向性和幅度加权对峰值旁瓣的优化有一定的影响,在多子阵天线的优化中必须综合考虑。

### 3 结论

当前,多子阵天线主要应用于宽带卫星移动通信中,有限的载体空间严格限制了多子阵天线的设计尺寸,如何根据安装环境设计符合要求的多子阵平板天线已经成为宽带卫星移动通信系统广泛推广和应用的关键技术。本文分析了天线口径、阵元、幅度衰减等因素对多子阵天线峰值旁瓣优化的影响,得到的结论可为多子阵天线的设计提供重要的参考依据,相关方法和技术也可应用于其他类型的天线阵列。

### 参考文献

- [1] BONGARD F, DEL RÍO D L, VIGANÓ M C, et al. A new aperture for switched-beam low-profile Ku-band mobile terminal array antennas [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54(3):289-300.
- [2] GARCÍA-AGUILAR A, INCIÁN-ALONSO J M, VIGIL-HERRERO L, et al. Low-profile dual circularly polarized antenna array for satellite communications in the X band [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(5):2276-2284.
- [3] MOUSAVI P, FAKHARZADEH M, JAMALI S H, et al. A

- low-cost ultra-low profile phased array system for mobile satellite reception using zero-knowledge beamforming algorithm [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(12):3667-3679.
- [4] 林志强,姚敏立,沈晓卫. 基于遗传算法的多子阵平板天线旁瓣电平优化[J]. *电波科学学报*, 2011, 26(2):369-375.  
LIN Z Q, YAO M L, SHEN X W. Sidelobe reduction of the planar antenna with multiple subarrays based on genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(2):369-375.
- [5] SON S H, PAR U H. Sidelobe reduction of low-profile array antenna using a genetic algorithm [J]. *ETRI Journal*, 2007, 29(1):95-98.
- [6] LIN Z Q, YAO M L, SHEN X W. Sidelobe reduction of the low profile multi-subarray antenna by genetic algorithm [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2012, 66(2):133-139.
- [7] 林志强,贾维敏,姚敏立,等. 混合扫描多子阵平板天线旁瓣电平优化研究[J]. *微波学报*, 2011, 27(6):54-58.  
LIN Z Q, JIA W M, YAO M L, et al. Sidelobe reduction of the hybrid scanning planar antenna with multiple subarrays[J]. *Journal of Microwaves*, 2011, 27(6):54-58.
- [8] RaySat, Inc. SpeedRay™ 3000 installation & user guide [R]. Virginia, US, 2008.
- [9] JUNG Y B, EOM S Y, JEON S. Experimental design of mobile satellite antenna system for commercial use [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(2):429-435.
- [10] MARCELLINI L, FORTI R L, BELLAVEGLIA G. Future developments trend for Ku and Ka antenna for satcom on the move [C]//*Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011)*, 2011:2346-2350.
- [11] COOK K L B. Current wideband MILSATCOM infrastructure and the future of bandwidth availability [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2010, 25(12):23-28.
- [12] GOUDOS S K, SIAKAVARA K, SAMARAS T, et al. Sparse linear array synthesis with multiple constraints using differential evolution with strategy adaptation [J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letter*, 2011, 10:670-673.
- [13] 陈客松,韩春林,何子述. 一种有阵元间距约束的稀布阵天线综合方法[J]. *电波科学学报*, 2007, 22(1):27-32.  
CHEN K S, HAN C L, HE Z S. A synthesis technique for linear sparse arrays with optimization constraint of minimum element spacing[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2007, 22(1):27-32.

(上接第 17 页)

由表 3、表 4 可以看出,对表 1、表 2 的分析结果完全适用于辐射源初始位置未知时的识别结果。对比可以看出,初始位置已知时的判别准确率要优于初始位置未知时的判别准确率;但对于参数测量精度较高时(如 10 ns),判别准确率依然很高,如表 3 所示,对运动目标的属性判别在 10 s 内准确率达 100%。

表 3、表 4 的判别结果是基于  $\alpha$  取 0.1 的识别结果,若在实际环境中允许虚假概率大些,则对运动目标的判别效果会更好些。

### 3 结束语

本文利用时差观测值的统计特征对海面远距离目标运动属性进行判别,该方法不用计算目标位置,仅需根据单侦察的时差参数观测值的统计特征判别目标的运动属性。仿真结果表明,利用该判别方法可以快速地海面远距离目标的运动属性进行准确判别,有较好的应用前景。但是,若目标运动曲线正好和时差等值位置线分布一致,仅依靠单个侦察站无法对目标的运动属性做出判别,此时需结合其他侦察站进行判别,若在与原侦察站垂直方向再部署一个侦察站,就可以对任意方向的运动目标实现高准确率的目标运动属性判别。

### 参考文献

- [1] 杨士英. 对海面远距离目标的高精度定位方法研究[J]. *电子信息对抗技术*, 2010, 25(6):7-10.  
YANG S Y. Study on high precision location method for offing remote target [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2010, 25(6):7-10.
- [2] 孙仲康,周一宇,何黎星. 单多基地有源无源定位技术[M]. 北京:国防工业出版社,1996:69-109.  
SUN Z K, ZHOU Y Y, HE L K. Single and multiple based active passive location technology [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1996:69-109.
- [3] 陈永光,孙仲康. T/R-R 型双基地系统分段跟踪技术的研究[J]. *航空学报*, 1994, 15(12):1515-1519.  
CHEN Y G, SUN Z K. A study on dividural tracking technique in T/R-R bistatic system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1994, 15(12):1515-1519.
- [4] 刘琪,孙仲康. 双基地两坐标雷达对三维目标的最优化定位算法[J]. *电子科学学刊*, 2000, 22(3):366-372.  
LIU Q, SUN Z K. Optimal location algorithms in 3D space with bistatic two coordinate radar[J]. *Journal of Electronics*, 2000, 22(3):366-372.
- [5] 杨士英,罗景青. 位置线误差的时/频差联合定位性能研究[J]. *现代雷达*, 2008, 30(2):25-28.  
YANG S Y, LUO J Q. Study of TDOA/FDOA location accuracy based on position-line error analysis [J]. *Modern Radar*, 2008, 30(2):25-28.