

阵面安装误差对相控阵雷达测角精度的影响

陶 军 唐晓雷 黄晓辉

(南京电子技术研究所, 南京, 210039)

摘 要: 分析阵面安装误差对相控阵雷达测角精度的影响, 对研究和设计高精度相控阵雷达非常重要。建立了相控阵雷达阵面安装误差-测角精度误差模型, 分别仿真分析了阵面倾角安装误差、阵面方位法向误差和阵面不水平度对相控阵雷达测角误差的影响。与理论公式相比, 推导出的简约式用于计算阵面安装误差引起的测角误差分析时精度达 0.001° 量级, 可以为相控阵雷达测角系统精度误差指标分配及测角精度超差问题分析定位提供快速、精确的理论依据和工程指导。

关键词: 方位法向误差; 不水平度; 倾角误差; 相控阵雷达

中图分类号: TN958.92 **文献标志码:** A

Angle Measurement Accuracy of Phased Array Radar with Array Installation Errors

Tao Jun, Tang Xiaolei, Huang Xiaohui

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210039, China)

Abstract: The analysis of the influence of the array installation errors on the angle measurement accuracy of the phased array radar is important for the research and development of the high-performance phased array radar. The array installation errors-angle measurement accuracy model of the phased array radar is established. The angle measurement accuracy of the phased array radar with inclination error, role-angle error and azimuth normal error is studied by simulation respectively. The precision of the deduced concise formula arrivers accuracy level of 0.001° compared with the angle measurement accuracy error caused by array installation errors. The deduced formula and conclusion offers theoretical basis and engineering guidance for assigning the accuracy index of array installation and analyzing the accuracy out-of-tolerance problem of angle measurement.

Key words: azimuth normal error; inclination error; role-angle error; phased array radar

引 言

现代战场高复杂电磁环境对雷达的要求越来越高, 相控阵雷达因可靠性高、隐身性能好、反干扰能力强及同时兼备搜索警戒、目标指示、导弹制导和火力控制等多项功能而逐渐成为现代雷达家族中的主流及核心^[1-4]。测角精度作为相控阵雷达的一项重要战技指标, 尤其是具备目标指示和制导功能的相控阵雷达, 其测角精度一般要求在 0.1° 范围内。由于装载平台的不同, 影响相控阵雷达系统精度的因素也比较多, 孙国政和张驿等研究了综合导航系统误差对舰载相控阵雷达测量精度的影响^[5,6], 王从思等研

究了阵面单元位置误差和阵面形变对相控阵雷达天线电性能的影响^[7-8],王玥等研究了通道误差对单脉冲雷达测角精度的影响^[9],史小斌等对车载阵列雷达姿势校正方法进行了研究^[10]。上述文献均未涉及阵面安装误差对相控阵雷达测角精度的讨论。

相控阵雷达出厂前及长期使用后需要对其机械零位进行标定^[11],包括:阵面倾角、阵面水平法向与正北夹角、不水平度(横滚)标定。阵面安装误差包括:机械零位标定误差、标定参数装订误差和雷达在长期使用过程中阵面及平台形变误差等。为此,本文通过坐标变换原理,建立了阵面安装误差-测角精度模型,分析了3种安装误差对相控阵雷达测角精度的影响,推导出安装误差与测角精度之间的简约关系式。文中的分析方法、结论和简约关系式为相控阵雷达平台安装公差分配及测角精度误差分析提供了相应的工程指导和理论参考。

1 阵面安装误差与测角精度误差模型

假设平面相控阵阵面安放在 $X''OY''$ 面,阵面安装倾角为 T ,阵面方位法向与正北夹角为 N_i ,空间一点 P 在阵面直角坐标系 (X'', Y'', Z'') 、空间直角坐标系 (X, Y, Z) 和空间极坐标系 (R, A_z, E) 中的坐标分别为 $P(x'', y'', z'')$ 、 $P(x, y, z)$ 、 $P(R, A_z, E)$, P 点在上述3个坐标系中关系如图1所示^[12]。空间直角坐标系与空间极坐标系中坐标变换关系为

$$\begin{aligned} x &= R \cos E \cdot \sin A_z \\ y &= R \sin E \\ z &= R \cos E \cdot \cos A_z \end{aligned} \quad (1)$$

假设阵面倾角安装误差为 $\Delta\gamma$;阵面方位法向与正北夹角安装误差为 $\Delta\sigma$,阵面不水平度为 $\Delta\delta$,空间直角坐标系中 $P_0(x_1, y_1, z_1)$ 在无阵面安装误差的阵面直角坐标系、空间极坐标系中的坐标分别为 $P_1(x_1'', y_1'', z_1'')$ 、 $P_2(R, A_{z_1}, E_1)$, 在存在阵面安装误差的阵面直角坐标系、空间直角坐标系、空间极坐标系中的坐标分别为 $P_1(x_2'', y_2'', z_2'')$ 、 $P_0(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_2(R, A_{z_2}, E_2)$ 。则有

$$\begin{aligned} P_0(x_2, y_2, z_2) &= L_5^{-1} \cdot L_4^{-1} \cdot L_3^{-1} \cdot P_1(x_2'', y_2'', z_2'') = \\ &L_5^{-1} \cdot L_4^{-1} \cdot L_3^{-1} \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot P_0(x_1, y_1, z_1) = \\ &L \cdot P_0(x_1, y_1, z_1) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: L_1, L_4 为沿 x 轴的旋转矩阵, L_2, L_5 为沿 y 轴旋转

矩阵, L_3 为沿 z 轴旋转矩阵,所有旋转角度均以顺时针旋转为正。变换矩阵 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 分别为

$$\begin{aligned} L_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos T & -\sin T \\ 0 & \sin T & \cos T \end{bmatrix}, L_3 = \begin{bmatrix} \cos \Delta\delta & \sin \Delta\delta & 0 \\ -\sin \Delta\delta & \cos \Delta\delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ L_2 &= \begin{bmatrix} \cos N_i & 0 & -\sin N_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin N_i & 0 & \cos N_i \end{bmatrix}, L_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(T + \Delta\gamma) & -\sin(T + \Delta\gamma) \\ 0 & \sin(T + \Delta\gamma) & \cos(T + \Delta\gamma) \end{bmatrix} \\ L &= L_5^{-1} L_4^{-1} \cdot L_3^{-1} L_1 \cdot L_2 = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(1-3)可得,空间同一目标在存在安装误差和无安装误差两种空间极坐标系下的相互关系为

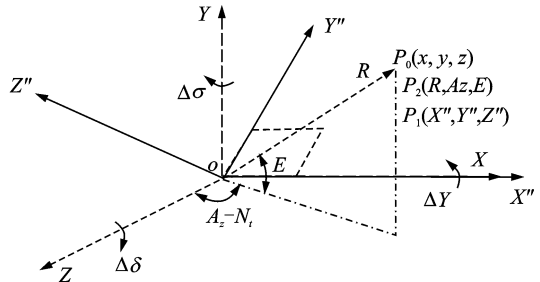


图1 空间 P 点在3种坐标系中关系示意图

Fig. 1 Relationship of spatial point P in three different coordinate systems

$$\begin{bmatrix} \cos E_2 \cdot \sin A z_2 \\ \sin E_2 \\ \cos E_2 \cdot \cos A z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{L} \cdot \begin{bmatrix} \cos E_1 \cdot \sin A z_1 \\ \sin E_1 \\ \cos E_1 \cdot \cos A z_1 \end{bmatrix}$$

推导得

$$E_2 = \arcsin(L_{21} \cdot \cos E_1 \cdot \sin A z_1 + L_{22} \cdot \sin E_1 + L_{23} \cdot \cos E_1 \cdot \cos A z_1) \quad (4)$$

$$A z_2 = \arctan \left[\frac{L_{11} \cdot \cos E_1 \cdot \sin A z_1 + L_{12} \cdot \sin E_1 + L_{13} \cdot \cos E_1 \cdot \cos A z_1}{L_{31} \cdot \cos E_1 \cdot \sin A z_1 + L_{32} \cdot \sin E_1 + L_{33} \cdot \cos E_1 \cdot \cos A z_1} \right] \quad (5)$$

阵面安装误差 Δ 一般比较小,达到 1° 已经非常大,此时有

$$\cos(\Delta) \approx 1, \sin(\Delta) \approx \tan(\Delta) \approx \Delta \quad (6)$$

式(4-5)即为阵面安装误差与测角精度误差模型关系式。以下分别讨论 3 种安装误差独立存在时对相控阵雷达测角精度的影响。

(1) 仅存在阵面方位法向安装误差 $\Delta\sigma$

此时阵面不水平度 $\Delta\delta = 0$, 阵面倾角误差 $\Delta\gamma = 0$, 即 $\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}_4, \mathbf{L}_3$ 为单位矩阵。由式(4-6)推导得

$$\begin{bmatrix} \cos E_2 \cdot \sin(A z_2) \\ \sin E_2 \\ \cos E_2 \cos(A z_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E_1 \cdot \sin(A z_1 + \Delta\sigma) \\ \sin E_1 \\ \cos E_1 \cos(A z_1 + \Delta\sigma) \end{bmatrix}$$

即

$$E_2 = E_1 \quad (7)$$

$$A z_2 = A z_1 + \Delta\sigma \quad (8)$$

(2) 仅存在阵面倾角安装误差 $\Delta\gamma$

此时阵面不水平度 $\Delta\delta = 0$, 阵面方位法向误差 $\Delta\sigma = 0$, 即 $\mathbf{L}_2 = \mathbf{L}_5, \mathbf{L}_3$ 为单位矩阵。

由式(4-6)推导得

$$E_2 = E_1 + \cos(\Delta A z_1) \cdot \Delta\gamma \quad (9)$$

$$A z_2 = \arctan \left[\frac{\cos E_1 \cdot \sin(\Delta A z_1)}{\cos E_1 \cdot \cos(\Delta A z_1) - \sin(\Delta\gamma) \cdot \sin E_1} \right] + N_t \quad (10)$$

$$\Delta A z_1 = A z_1 - N_t$$

(3) 仅存在阵面不水平度 $\Delta\delta$

此时阵面安装倾角误差 $\Delta\gamma = 0$, 阵面方位法向误差 $\Delta\sigma = 0$, 即 $\mathbf{L}_1 = \mathbf{L}_4, \mathbf{L}_2 = \mathbf{L}_5$ 。由式(4-6)推导得

$$E_2 = \cos(T) \cdot \sin(\Delta\delta) \cdot \sin(\Delta A z_1) + E_1 = \Delta\delta \cdot \cos(T) \cdot \sin(\Delta A z_1) + E_1 \quad (11)$$

$$A z_2 = \arctan \left[\tan(\Delta A z_1) + \sin(T) \cdot \Delta\delta - \frac{\cos(T) \cdot \Delta\delta \cdot \tan(E_1)}{\cos(\Delta A z_1) - \sin(T) \cdot \Delta\delta \cdot \sin(\Delta A z_1)} \right] + N_t \quad (12)$$

文中推导出的式(7-12)称为简约式。

2 仿真结果及分析

2.1 阵面方位法向误差 $\Delta\sigma$ 对测角精度影响分析

由式(7,8)可得,当阵面方位法向存在误差 $\Delta\sigma$ 时,可以得出如下结论:

结论 1:仰角测角不受 $\Delta\sigma$ 影响。

结论 2:方位测角引入一个大小为 $\Delta\sigma^\circ$ 的测量误差,即人为引进一个 $\Delta\sigma^\circ$ 的方位系统误差。

根据式(3-5)仿真出 $\Delta\sigma$ 对测角影响,如图 2 所示。

从图 2 可以看出, $\Delta\sigma$ 对仰角测角无影响,方位测角引起的测角误差与 $\Delta\sigma$ 成线性关系,即认为引入一个 $\Delta\sigma^\circ$ 的系统误差。与式(7,8)分析一致。

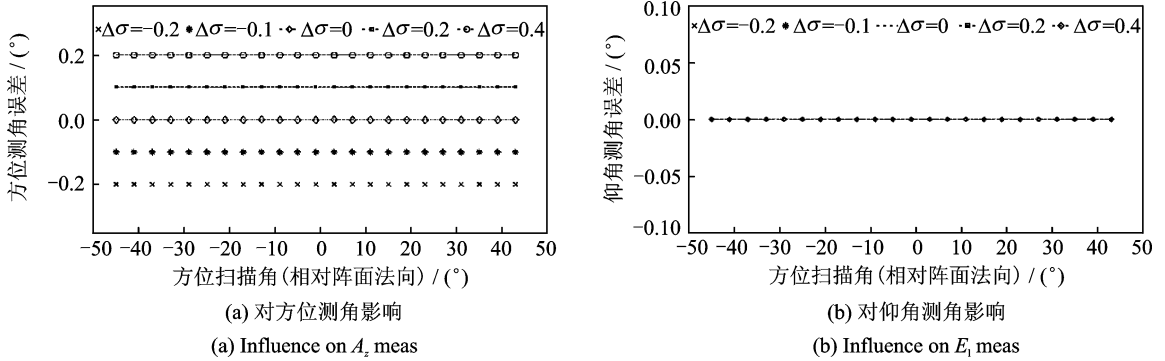


图2 $\Delta\sigma$ 对测角影响

Fig. 2 Influence of $\Delta\sigma$ on angle Meas

2.2 阵面倾角 T 误差 $\Delta\gamma$ 对测角精度影响分析

由式(9,10)可得,当阵面倾角存在误差 $\Delta\gamma$ 时,可以得出如下结论:

结论 3:仰角测角引入了一个误差项 $\cos\Delta A_{z1} \cdot \Delta\gamma$,说明安装倾角误差带来的仰角测角误差受到方位扫描角和倾角误差联合调制,与仰角扫描角无关。

结论 4:方位测角引入一个误差项 $\arctan\left[\frac{\cos E_1 \cdot \sin(\Delta A_{z1})}{\cos E_1 \cdot \cos(\Delta A_{z1}) - \sin(\Delta\gamma) \cdot \sin E_1}\right] - \Delta A_{z1}$,说明安装倾角误差带来的方位测角误差受到方位扫描角、仰角扫描角和倾角安装误差三者的联合调制。

根据式(3-5)仿真出 $\Delta\gamma$ 对测角误差影响如图 3,4 所示。

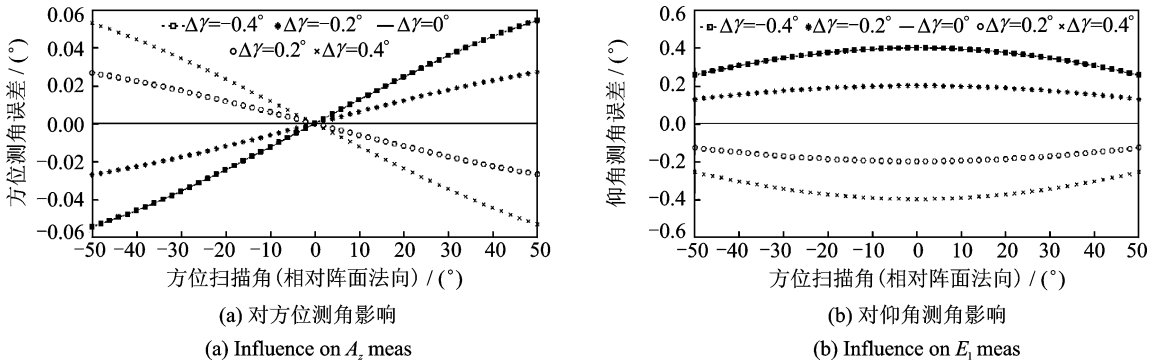


图3 E 固定, $\Delta\gamma$ 变化对测角影响

Fig. 3 Influence of $\Delta\gamma$ on angle meas with E fixed

从图 3 可以看出,当仰角扫描角固定时,由阵面倾角误差 $\Delta\gamma$ 带来的方位测角误差相对于方位法向 N_i 成奇对称关系,随着方位扫描角变大,方位测角误差随倾角误差 $\Delta\gamma$ 变大而变大,当 $E_1 = 20^\circ$ 、 $\Delta\gamma = 0.4^\circ$ 、 A_z 扫至边缘时,方位测角误差达 0.05° 。由阵面倾角误差 $\Delta\gamma$ 带来的仰角测角误差相对于方位法向 (N_i) 成偶对称关系,在方位法向时,倾角误差 $\Delta\gamma$ 引起的仰角测角误差与 $\Delta\gamma$ 成正比。方位扫至边缘 ($A_z = 50^\circ$),仰角测角误差为 0.1286° ($\Delta\gamma = 0.2^\circ$),与式(6)计算结果一致。从图 4 可以看出:当阵面倾角误差 $\Delta\gamma$ 固定,由仰角扫描带来的方位测角误差相对于方位法向 N_i 成奇对称关系,随着方位扫描角变大,方位测角误差随仰角扫描角变大而变大,当 $E_1 = 40^\circ$ 、 A_z 扫至边缘时 ($A_z = 50^\circ$),方位测角误差达

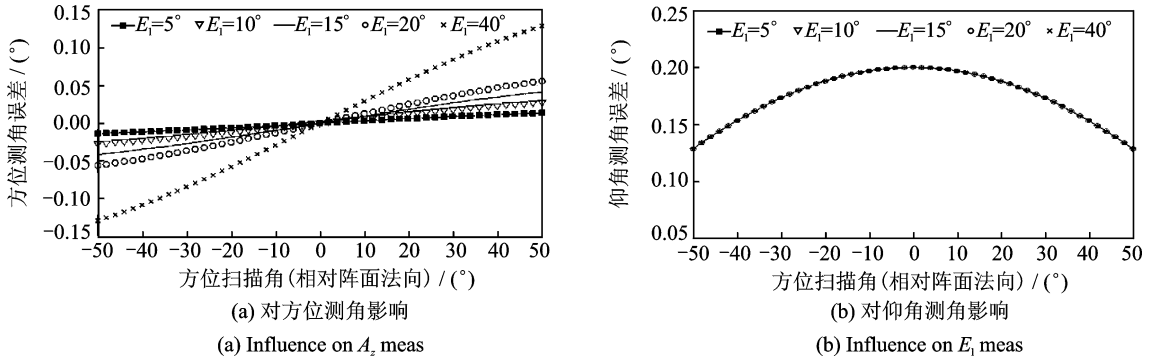


图 4 $\Delta\gamma = 0.2^\circ$, E 变化对测角影响

Fig. 4 Influence of E on angle meas with $\Delta\gamma$ fixed

0.13°。仰角测角精度与仰角扫描角度无关。阵面倾角误差导致的测角误差分析结果与式(9,10)一致。

2.3 阵面不水平度 $\Delta\delta$ 对测角精度影响分析

由式(11,12)可得,当存在阵面不水平度 $\Delta\delta$ 时,可以得出如下结论:

结论 5:仰角测角引入了一个误差项 $\Delta\delta \cdot \cos(T) \cdot \sin(\Delta A_{z1})$,说明阵面不水平度导致的仰角测角误差受到方位扫描角、阵面倾角及阵面不水平度联合调制,与仰角扫描角无关。

结论 6:方位测角引入了一个误差项 $\arctan\left[\tan(\Delta A_{z1} + \sin(T) \cdot \Delta\delta) - \frac{\cos(T) \cdot \Delta\delta \cdot \tan E}{\cos(\Delta A_{z1}) - \sin(T) \cdot \Delta\delta \cdot \sin(\Delta A_{z1})}\right] - \Delta A_{z1}$,说明阵面不水平度带来的方位测角误差受到方位扫描角、仰角扫描角、阵面倾角和不水平度四者的联合调制。

根据式(3-5)仿真出阵面不水平度对测角误差影响如图 5-7 所示。

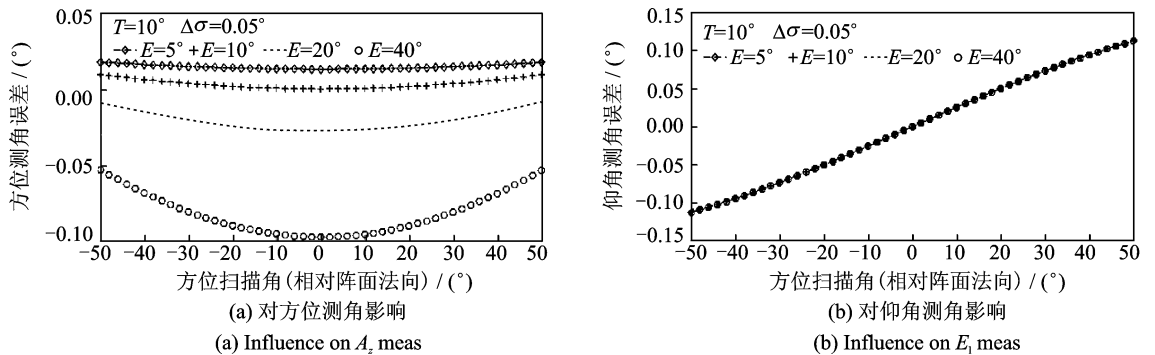
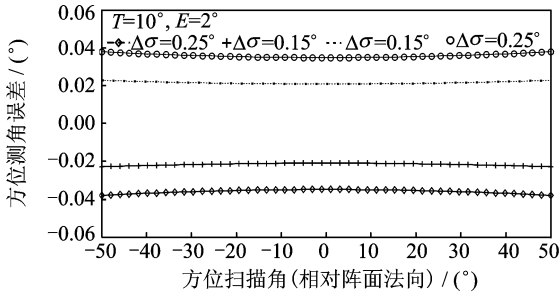


图 5 T 和 $\Delta\delta$ 不变, E 变化对测角影响

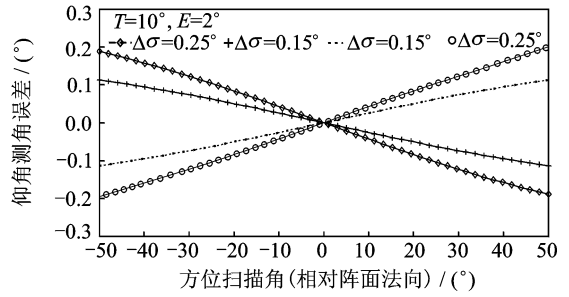
Fig. 5 Influence of E on angle meas with T and $\Delta\delta$ fixed

由图 5 可以看出,当阵面倾角和不水平度固定的情况下,方位测角误差随仰角扫描角增大而增大,当 $A_z = 0^\circ$, $E = 40^\circ$ 时,方位测角误差达到 0.1°。仰角测角误差不受仰角扫描角影响。结果与式(11)一致。

由图 6 可以看出,当阵面倾角和仰角扫描角固定时,方位测角误差随不水平度绝对值的变大而变大;且不水平度顺时针与逆时针旋转相同角度时,方位测角误差相同。仰角测角误差关于方位法向 N ,



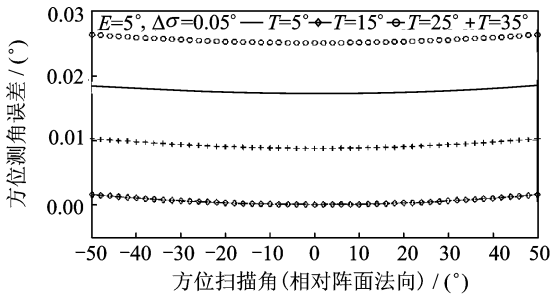
(a) 对方位测角影响
(a) Influence on A_2 meas



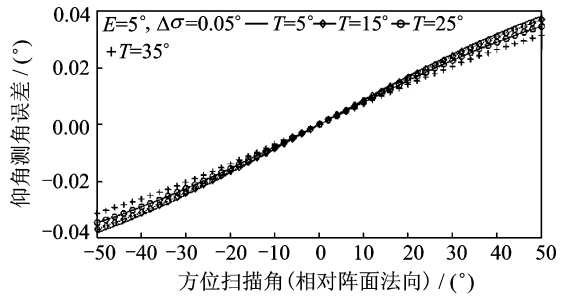
(b) 对仰角测角影响
(b) Influence on E_1 meas

图 6 T 和 E 不变, $\Delta\delta$ 变化对测角影响

Fig. 6 Influence of $\Delta\delta$ on angle meas with T and E fixed



(a) 对方位测角影响
(a) Influence on A_2 meas



(b) 对仰角测角影响
(b) Influence on E_1 meas

图 7 $\Delta\delta$ 和 E 不变, T 变化对测角影响

Fig. 7 Influence of T on angle meas with $\Delta\delta$ and E fixed

成奇对称。随着方位扫描角变大,仰角测角误差随不水平度变大而变大,当不水平度为 0.25° ,方位扫描至边缘时 ($A_2 = 50^\circ$),仰角测角误差达到 0.2° 。由图 7 可以看出,当不水平度和仰角扫描角固定时,方位测角误差随着阵面倾角 T 变大而变大。仰角测角误差关于方位法向 N_i 成奇对称。随着方位扫描角变大,仰角测角误差随不水平度变大而变大,当倾角为 35° ,方位扫描至边缘时 ($A_2 = 50^\circ$),仰角测角误差达到 0.03° 。从上述分析可以看出,当存在阵面不水平度时,方位测角误差受不水平度、倾角、仰角扫描角和方位扫描角联合调制,而仰角测角误差受不水平度、倾角和方位扫描角联合调制,与仰角扫描角无关。分析结果与式(11,12)一致。

3 简约式用于误差计算时的精度分析

由式(3-5)仿真计算出的测角误差作为真值,式(7-12)作为测量值,分别讨论简约式用于计算平台安装误差对相控阵雷达测角精度影响时的精度,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,简约式用于安装误差对测角精度影响分析计算的误差要小于 0.001° 。可以用于阵面安装误差对相控阵雷达测角精度影响的分析和评估。

4 结束语

针对阵面安装误差对相控阵雷达测角精度影响问题,建立了相控阵雷达的阵面安装误差-测角精度

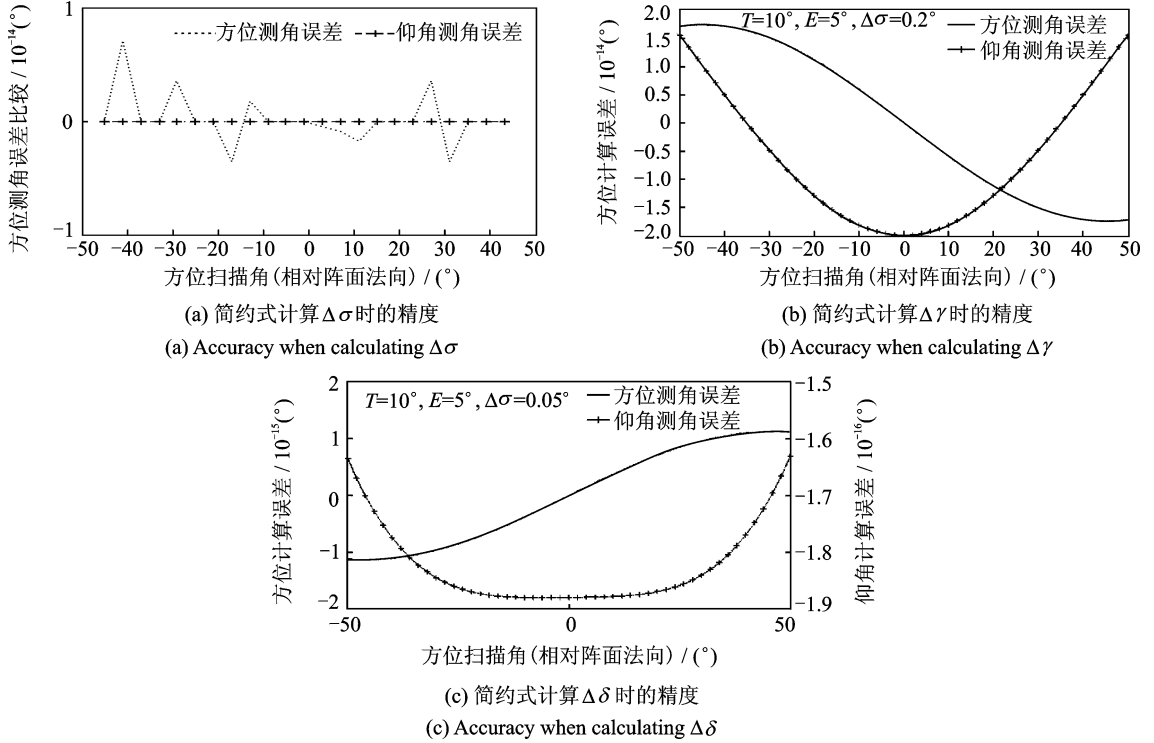


图 8 简约式用于计算平台安装误差对相控阵雷达测角影响时的精度

Fig. 8 Accuracy of concise formula

误差模型。分别分析了阵面方位法向安装误差、阵面倾角安装误差和阵面不水平度对相控阵雷达测角精度误差影响程度。综合仿真结果,可以看出:

(1) 阵面方位法向安装误差仅影响方位测角精度、对仰角测角没有影响;阵面倾角安装误差和方位扫描角共同影响仰角测角误差,而方位测角误差受倾角安装误差、仰角扫描角和方位扫描角联合调制影响。

(2) 阵面不水平度、方位扫描角和阵面倾角对仰角测角误差起到联合调制的作用,而方位测角误差不仅受阵面不水平度、方位扫描角和阵面倾角的影响还受扫描角的影响。文中所得结论和推导的简约式可以为相控阵雷达总体设计的系统精度误差源指标分配及测角精度超差问题分析定位提供快速、精确的理论依据。在后期工作中,将结合载体特性(如舰载)分析影响相控阵雷达测角精度的因素,并进一步研究平台安装存在误差情况下的波束指向修正问题。

参考文献:

- [1] 周万幸. 舰载雷达的现状与发展趋势分析[J]. 现代雷达, 2007, 29(9): 1-4.
Zhou Wanxing. Status and development trend analysis on shipboard radar[J]. Modern Radar, 2007, 29(9): 1-4.
- [2] 罗敏. 多功能相控阵雷达发展现状及趋势[J]. 现代雷达, 2011, 33(9): 14-18.
Luo Min. Development status and trend of MPAR[J]. Modern Radar, 2007, 29(9): 14-18.
- [3] 朱家昌, 赵玉洁, 贲德. 机载有源相控阵火控雷达发展现状及趋势[J]. 电讯技术, 2007, 47(4): 6-10.
Zhu Jiachang, Zhao Yujie, Ben De. Present status and future trends in airborne active phased array fire-control radars[J]. Telecommunication Engineering, 2007, 47(4): 6-10.

- [4] 郭建明, 谭怀英. 雷达技术发展综述及第五代雷达初探[J]. 现代雷达, 2012, 34(2): 1-3.
Guo Jianming, Tan Huaiying. Overview of radar technology development and initial study on the 5th generation of radar[J]. Modern Radar, 2012, 34(2): 1-3.
- [5] 孙国政. 综合导航系统误差对舰载三坐标相控阵雷达精度的影响分析[J]. 现代雷达, 2006, 28(2): 15-35.
Sun Guozheng. Analysis of effects on accuracy of ship-borne 3D phased array radar due to system error of synthetic navigation [J]. Modern Radar, 2006, 28(2): 15-35.
- [6] 张驿, 王辉. 摇摆状态一维相控阵天线波束指向修正[J]. 电讯技术, 2011, 51(6): 94-97.
Zhang Yi, Wang Hui. Beam pointing correction for linear phased array antenna in swing state[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(6): 94-97.
- [7] 王从思, 康明魁. 基于阵面变形误差的有源相控阵天线电性能分析[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2520-2526.
Wang Congsi, Kang Mingkui. On coupled structural-electromagnetic model of active phased array antennas with array plane structural distortion errors[J]. Acta Electronic Sinica, 2014, 42(12): 2520-2526.
- [8] 王从思, 王伟峰, 王伟, 等. 基于单元位置误差的有源相控阵天线辐射和散射性能综合分析[J]. 系统工程与电子技术, 2104, 36(10): 1893-1898.
Wang Congsi, Wang Weifeng, Wang Wei, et al. Integrated analysis of radiation and scattering performances of active phased array antennas with element position errors[J]. Systems Engineering and Electronic, 2104, 36(10): 1893-1898.
- [9] 王玥, 吕明. 单脉冲雷达系统通道一致性校正方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(1): 5-9.
Wang Yue, Lü Ming. Study on the calibration technique between sum and difference channels in monopulse system[J]. Journal of UEST of China, 2003, 32(1): 5-9.
- [10] 史小斌, 顾红, 苏卫民, 等. 车载阵列雷达姿态校正方法[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(4): 454-459.
Shi Xiaobin, Gu Hong, Su Weimin, et al. Vehicle-borne array radar attitude correction method[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(4): 454-459.
- [11] 赵馨, 王世峰, 佟首峰, 等. 舰载雷达零位标校新法[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(2): 169-172.
Zhao Xin, Wang Shifeng, Tong Shoufeng, et al. New method on zero position calibration of ship-borne radar[J]. Fire Control & command Control, 2010, 35(2): 169-172.
- [12] 何友, 修建娟. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 60-66.
He You, Xiu Jianjuan. Radar data processing with applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 60-66.

作者简介:



陶军(1974-), 高级工程师, 研究方向: 相控阵雷达总体和波控系统, E-mail: 46057244@qq.com。



唐晓雷(1983-), 工程师, 研究方向: 舰载相控阵雷达系统集成及总体技术。

黄晓辉(1977-), 高级工程师, 研究方向: 相控阵雷达系统设计。

