

高斯-克吕格投影在防空指控系统中的应用

王君¹, 舒培贵^{1,2}, 周林¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 中国航天科工集团二院, 北京 100854)

摘要:为解决以往采用方格坐标(九九方格、五五方格)进行空情显示和报知,效率和精度都很低的问题,研究了高斯-克吕格投影在防空指挥控制系统中的典型应用。采用 IUGG-75 地球椭球模型,将点的地理坐标转换为高斯-克吕格坐标,计算出子午线收敛角,建立坐标转换矩阵,得出点的站心地平直角坐标间的转换模型,然后通过求解导出的一元二次方程,得到点在目标站中的垂直坐标。计算分析表明,建立的模型避免了复杂的坐标变换计算,精度高,可将高斯-克吕格投影用于描述空情,射击指挥的显示和站心直角坐标间的转换。

关键词:防空指挥控制系统;高斯-克吕格投影;地理坐标;坐标变换

中图分类号: TP311.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)03-0024-04

测绘部门为测绘地形图,将椭球面上各点的大地经、纬度按一定的数学法则投影到平面,计算出各点的平面坐标。高斯-克吕格投影(Gauss-Kruger Projection)是目前世界上很多国家大比例尺地形图采用的投影方法,其投影平面的坐标称为高斯-克吕格平面直角坐标。高斯-克吕格坐标是通用的军用坐标系,用于描述空情、地情坐标和射击指挥显示坐标,使用高斯-克吕格坐标可减少大量的坐标变换计算,在作战单元级和战区指挥所中,以往都是采用方格坐标(九九方格、五五方格)进行空情的显示和报知,效率和精度都很低^[1-2]。随着防空武器装备的发展,作战单元和战区的作战范围可达上千公里,采用传统的坐标系统方案已经不能满足发展的需要,所以十分有必要对高斯-克吕格坐标在防空指挥控制系统中的应用进行研究,以满足武器研制和使用的需求。

1 高斯-克吕格投影原理

在建立防空指挥控制系统坐标方案时,由于防空探测区、作战区覆盖范围广,采用圆球地球模型会带来比较大的误差,所以我们用参考椭球体来近似地球,地球椭球模型参见文献[3]。

高斯-克吕格投影的基本原理参见文献[4]。高斯-克吕格投影是一种等角投影,投影后角度没有变形,在较小范围内图上的形状与实地是相似的,故地物之间的方向和关系位置是正确的。在长度方面,投影后,长度有变形(除了中央子午线投影外),如投影区域较大,就很难保证长度变形不超出允许范围。为控制变形不超过一定限值,通常将地球椭球分成若干个带,以分带进行投影。目前采用的分带方法有两种,一种是3°带;另一种是6°带。投影范围受到限制,则长度变形就不会太大了,从而即能保证点与点之间距离与实地相比误差不大。

2 借助高斯-克吕格投影的站心地平直角坐标间的转换模型

防空指挥控制系统中,采用的传感器主要为各种雷达,这些雷达采用站心地平直角坐标系^[5-6](坐标原

收稿日期:2007-03-30

基金项目:国防预研基金资助项目(413060402)

作者简介:王君(1976-),男,吉林东丰人,博士生,主要从事复杂武器系统建模、仿真与效能评估研究;
E-mail: wangjun197618@163.com

舒培贵(1963-),男,湖南长沙人,研究员,硕士生导师,主要从事防空导弹指挥控制系统研究;

周林(1965-),男,江苏涟水人,教授,硕士生导师,主要从事防空作战建模与仿真研究。

点 o 固定于雷达部署点, ox 轴指向正北, oz 轴指向正东, oy 轴指向天顶) 观测空中目标, 对于作战单元来说, 需要把各种信息源送来的目标数据进行坐标统一, 即将各批目标的位置和运动参数统一到作战单元本地站心地平直角坐标系中进行融合处理, 因此需要进行站心地平直角坐标系之间的坐标转换计算。

设目标 T 在雷达站 i 的站心地平直角坐标系中的坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 雷达站 i 的站心的地理坐标^[3] 为 (L_i, B_i) , 雷达站 j 的站心的地理坐标为 (L_j, B_j) , 求目标 T 在雷达站 j 的站心地平直角坐标系中的坐标 (x_j, y_j, z_j) , 计算步骤如下:

第1步 计算雷达站 i, j 的高斯-克吕格平面直角坐标 (x_{gi}, y_{gi}, H_{gi}) 、 (x_{gj}, y_{gj}, H_{gj}) ^[5,8-9]。

$$\begin{cases} x_g = s(B)/10^6 + \frac{l^2}{2\rho^2(B)}N(B)\sin B\cos B + \frac{l^4}{24\rho^4(B)}N(B)\sin B\cos^3 B(5 - \tan^2 B + 9\eta^2(B) + 4\eta^4(B)) + \\ \quad \frac{l^6}{720\rho^6(B)}N(B)\sin B\cos^5 B(61 - 58\tan^2 B + \tan^4 B - 330\eta^2(B)\tan^2 B) \\ y_g = \frac{l}{\rho(B)}N(B)\cos B + \frac{l^3}{6\rho^3(B)}N(B)\cos^3 B(1 - \tan^2 B + \eta^2(B)) + \\ \quad \frac{l^5}{120\rho^5(B)}N(B)\cos^5 B(5 - 18\tan^2 B + \tan^4 B + 14\eta^2(B) - 58\eta^2(B)\tan^2 B) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\eta(B) = e' \cos B$; 矢量半径与纬度的关系 $\rho(B)$ 为

$$\rho(B) = a(1 - 1/2e^2 \sin^2 B + 1/2e^4 \sin^2 B - 5/8e^4 \sin^4 B) \quad (2)$$

卯西圈曲率半径 $N(B)$ 为

$$N(B) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (3)$$

$s(B)$ 为赤道到计算点所在纬度 B 的经线弧长, 可按式(4)确定, 也可按式(5)进行估算。

$$s(B) = |a(1 - e^2) \left[Q_1 B - \frac{1}{2} Q_2 \sin 2B + \frac{1}{4} Q_3 \sin 4B \right]| \quad (4)$$

$$s(B) = |1111\ 133.004\ 7B - (32\ 009.857\ 5 \sin B + 133.960\ 2 \sin^3 B + 0.697\ 6 \sin^5 B + 0.003\ 9 \sin^7 B) \cos B| \quad (5)$$

式(1)中, $s(B)$ 的计算应注意, 当计算点在南纬时, 即当 $-90^\circ \leq B \leq 0^\circ$ 时, $s(B)$ 应取负值; 当计算点在北纬时, 即当 $0^\circ \leq B \leq 90^\circ$ 时, $s(B)$ 应取正值。 l 为计算点大地经度与计算点所在高斯-克吕格投影带的中央子午线经度之差, (x_g, y_g) 的计算单位取 rad, (x_g, y_g) 计算结果的单位为 km。

式(4)中: $Q_1 = 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4$; $Q_2 = 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{15}{16}e^4$; $Q_3 = \frac{15}{64}e^4$; B 的取值范围为 $-90^\circ - 90^\circ$, B 的计算单位为 rad, 因为弧长为正值, 所以式中加了绝对值符号, $s(B)$ 的计算结果单位为 m。式(5)中, B 的取值范围为 $-90^\circ - 90^\circ$, B 的计算单位为 $(^\circ)$, $s(B)$ 的计算结果为 m, 因经线弧长为正值, 故两式中加了绝对值符号。

对于 IUGG-75 椭球模型 $e^2 = 0.006\ 694\ 384\ 999\ 587\ 974\ 50$, $e'^2 = 0.006\ 739\ 501\ 819\ 472\ 950\ 12$, $a = 6\ 378\ 140\ m$ 。

第2步 计算雷达站 i, j 的站心所对应的平面子午线收敛角 $\gamma_i, \gamma_j, \gamma$ 角的计算模型为

$$\gamma(l, B) = |l \sin B + \frac{l^3}{3\rho^2(B)} \sin B \cos^2 B (1 + 3\eta^2(B) + 2\eta^4(B)) + \frac{l^5}{15\rho^4(B)} \sin B \cos^4 B (2 - \tan^2 B)| \quad (6)$$

式中, l 和 γ 的单位为 $(^\circ)$, γ 不能为负角度, 所以计算公式中加了绝对值符号。

第3步 计算系数矩阵 M^{ij} 。

$$M^{ij} = \begin{pmatrix} m_{11}^{ij} & m_{12}^{ij} & m_{13}^{ij} & m_{14}^{ij} \\ m_{21}^{ij} & m_{22}^{ij} & m_{23}^{ij} & m_{24}^{ij} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: $m_{11}^{ij} = \cos(L_j - L_i) (\sin B_i \sin B_j \cos \gamma_i \cos \gamma_j + \sin \gamma_i \sin \gamma_j) + \sin(L_j - L_i) (\sin \gamma_j \cos \gamma_i \sin B_i - \sin B_j \cos \gamma_j \sin \gamma_i) + \cos B_j \cos B_i \cos \gamma_i \cos \gamma_j$; $m_{12}^{ij} = \cos(L_j - L_i) (+ \sin B_j \cos \gamma_j \sin B_i \sin \gamma_j + \sin \gamma_j \cos \gamma_i) - \sin(L_j - L_i) (\sin B_j \cos \gamma_j \cos \gamma_i + \sin \gamma_j \sin \gamma_i \sin B_i) - \cos B_i \cos B_j \sin \gamma_i \cos \gamma_j$; $m_{13}^{ij} = [- \sin B_j \cos B_i \cos(L_j - L_i) + \sin B_i \cos B_j] \cos \gamma_j - \cos B_i \sin(L_j - L_i) \sin \gamma_j$; $m_{14}^{ij} = [N(B_i) + H_{gi}] \{ [- \sin B_j \cos B_i \cos(L_j - L_i) + \cos B_j \sin B_i] \cos \gamma_j - \cos B_i \sin(L_j - L_i) \sin \gamma_j \} + e^2 \cos \gamma_j \cos B_j [N(B_j) \sin B_j - N(B_i) \sin B_i]$; $m_{21}^{ij} = \cos(L_j - L_i) (\cos \gamma_j \sin \gamma_i - \sin B_i \sin B_j + \cos \gamma_i \cos \gamma_j) + \sin(L_j - L_i) (\sin B_j \sin \gamma_i \sin \gamma_j + \sin B_i \cos \gamma_i \cos \gamma_j) - \cos B_i \cos B_j \sin \gamma_j \cos \gamma_i$; $m_{22}^{ij} = \cos(L_j - L_i) (\sin B_i \sin B_j \sin \gamma_i \sin \gamma_j + \cos \gamma_i \cos \gamma_j)$

+ $\sin(L_j - L_i)(\sin B_j \sin \gamma_j \cos \gamma_i - \sin B_i \sin \gamma_i \cos \gamma_j) + \cos B_i \cos B_j \sin \gamma_i \cos \gamma_j$; $m_{23}^j = [\sin B_j \cos B_i \cos(L_j - L_i) + \sin B_i \cos B_j] \sin \gamma_j - \cos B_i \sin(L_j - L_i) \cos \gamma_j$; $m_{24}^j = [N(B_i) + H_{gi}] \{-\sin(L_j - L_i) + \cos B_i \cos B_j + \sin \gamma_j [\sin B_j \cos B_i \cos(L_j - L_i) + \sin B_i \cos B_j]\} - e^2 \sin \gamma_j \cos B_j [N(B_j) \sin B_j - N(B_i) \sin B_i]$ 。

第4步 计算目标在雷达站 j 的站心地平直角坐标系中的坐标 (x_j, y_j, z_j) 。

$$\begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{pmatrix} = M^j \times \begin{pmatrix} x_i \\ z_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8) \quad y_j = h - H_{gi} - \frac{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}{2N(B_j)} \quad (9)$$

式中, h 为目标 M 的海拔高度, $h = y_i + H_{gi} + \frac{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}{2N(B_j)}$ 。求解方程(9)可得

$$y_j = -N(B_j) \pm \sqrt{N^2(B_j) - x_j^2 - z_j^2 + 2N(B_j)(h - H_{gi})}$$

舍去负根,得 $y_j = -N(B_j) \pm \sqrt{N^2(B_j) - x_j^2 - z_j^2 + 2N(B_j)(h - H_{gi})}$ 。

3 计算实例

表1给出了借助地心直角坐标^[6,10-11]和高斯-克吕格坐标^[12]进行站心地平直角坐标间的转换实例,设雷达站点1部署位置 $L = 108.9429^\circ, B = 34.1397^\circ, H = 0$ m;雷达站点2部署位置 $L = 112.3062^\circ, B = 34.6057^\circ, h = 0$ m。

表1 站心地平直角坐标间的转换计算实例

Tab. 1 Computation examples between one station's core horizontal orthogonal coordinate system

站点1中测量的目标坐标 (x, y, z) /m	转换到站点2中的目标坐标 (x, y, z) /m	
	借助地心直角坐标系	借助高斯-克吕格坐标系
(80 000, 3 000, 70 000)	(31 076.06, -611.16, -237 662.47)	(31 076.06, -613.16, -237 662.47)
(-65 000, 5 000, 80 000)	(-114 187.38, 574.64, -232 550.88)	(-114 187.38, 578.04, -232 550.88)
(50 000, 11 000, -35 000)	(4 533.37, 2 041.13, -343 857.81)	(4 533.37, 2 040.24, -343 857.81)

通过地心直角坐标系完成站点间站心地平直角坐标系的坐标转换不存在模型误差,只有测量误差、定位误差和地球模型误差。计算实例中,通过高斯-克吕格坐标系坐标转换的误差在水平面上基本没有转换误差,在铅垂方向上只有几米。可见,通过高斯-克吕格坐标系进行站心地平直角坐标系间的转换在水平方向上有很高的精度,在垂直方向上误差也不大,满足射击指挥的精度要求。因此,可以借助高斯-克吕格投影作为站点间坐标转换的工具,用高斯-克吕格坐标系做直观的射击指挥显示坐标系。

4 结束语

在防空指挥控制系统中,目标数据的显示和转换是必须首先解决的问题。在大范围防空,必须把地球作为椭球体考虑,本文提出的模型已经在某新型防空导弹指挥控制系统中得到应用,模型合理有效,精度高,满足工程研制需求,具有很大的军事应用价值。

参考文献:

- [1] 贺正洪, 胥明军. 一种适合防空 C^3I 的坐标变换方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(7): 45-46.
HE Zhenghong, XU Mingjun. Methods of Coordinate Transformation for the Air Defense C^3I [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 22(7): 45-46. (in Chinese)
- [2] 贺正洪, 赵学军, 张金成. 分布式防空 C^3I 的坐标变换体系[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(6): 1044-1047.
HE Zhenghong, ZHAO Xuejun, ZHANG Jincheng. Coordinate Transformation Systems for the Distributed Air-defense C^3I [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(6): 1044-1047. (in Chinese)
- [3] 张守信. 外弹道测量与卫星轨道测量基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHANG Shouxin. The Foundation of Trajectories Secondary Planet Orbit Measure[M]. Beijing: National Defence Industry

- Press, 1999. (in Chinese)
- [4] 吴忠性, 杨启和. 数学制图原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1989.
WU Zhongxing, YANG Qihe. Mathematics Cartography Theory[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1989. (in Chinese)
- [5] 王 君, 周 林, 白华珍. 地空导弹旅(团)指挥控制系统坐标变换模型[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(8): 65-67.
WANG Jun, ZHOU Lin, BAI Huazhen. Coordinate Transformation Model of Ground to Air Missile Brigade C² System[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(8): 65-67. (in Chinese)
- [6] Zhou Yifeng, Lenry L, Martin B. Sensor Alignment with Earth - centered Earth - fixed(ECEF) Coordinate System[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(2): 410-417.
- [7] Olson D K. Converting Eart - Centered Earth - Fixed(ECEF) Coordinates to Geodetic Coordinates[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1): 473-476.
- [8] Pollard J. Iterative Vector Methods for Computing Geodetic Latitude and Height From Rectangular Coordinates[J]. J Geod, 2002, 76(1): 36-40.
- [9] Lin Kuochi, Huat N. Coordinate Transformations in Distributions in Distributed Interactive Simulation DIS[J]. Simulation, 1993, 61(5): 326-330.
- [10] Jones G C. New Solutions for the Geodetic Coordinate Transformation[J]. J Geod, 2002, 76(8): 437-446.
- [11] Vermeille H. Direct Transformation From Geocentric Coordinates to Geodetic Coordinates[J]. J Geod, 2002, 76(8): 451-454.

(编辑: 田新华)

The Application of Gauss - Kruger Projection in Air Defense Command and Control System

WANG Jun¹, SHU Pei - gui^{1,2}, ZHOU Lin¹

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. The Second System Design Department of the Second Research Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to solve the problem that the efficiency and precision are low if air situation is displayed and reported by grid coordinates (nine - nine and five - five grid), the typical application of the Gauss - Kruger projection in air defense command and control system is studied. The station's core horizontal orthogonal coordinates converting model can be founded by transforming the geography coordinates to Gauss - Kruger coordinates, working out the meridian convergence angle and setting up converting coordinates matrix. And then by calculating the educed unitary quadratic equation, the target station vertical coordinates are worked out. The Analysis shows that the model can be used to avoid complex coordinate's transformation computation, obtain higher precision than before, and by using which, Gauss - Kruger projection can be applied to describing air situation, displaying the firing command and converting the station's core horizontal orthogonal coordinates.

Keywords: air defense command and control system; Gauss - Kruger Projection; geographic coordinate; coordinate transformation