

# 基于加权几何精度因子 (WGDOP) 的地基导航系统评价方法

杨楠<sup>1</sup>, 李昊<sup>2</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 刘长水<sup>1</sup>

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073;

2. 陆航驻北京地区军事代表室, 北京 100101)

**摘要:** 为了评价卫星导航系统中位置估计的性能, GDOP 作为一种衡量测量误差和定位误差之间几何关系的评价方法被广泛应用; 由于地基导航系统各个单元的测量误差不同, 且受用户距离影响不可忽略, 需要对与距离有关的评价标准进行研究; 因此, 提出使用 WGDOP 代替 GDOP 作为评判标准, 从分析地基导航系统误差方差入手, 对 WGDOP 表达式进行详细分析, 通过系统比较两种定位因子, 说明采用 WGDOP 作为地基导航系统基站布设评价标准, 准确性高; 研究表明, 采用加权几何精度因子作为评价标准, 可以更适应地基导航系统的实际使用环境, 对系统定位性能进行更精确的评价, 对精度因子评估有明显改善。

**关键词:** 地基导航系统; 加权几何精度因子; 几何精度因子

## Evaluating Foundations Navigation System Based on Weighted Geometric Dilution of Precision

Yang Nan<sup>1</sup>, Li Hao<sup>2</sup>, Liu Kai<sup>1</sup>, Liu Changshui<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China;

2. Army Aviation Military Representative Office, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to evaluate the performance of position estimation in satellite navigation systems, GDOP is widely used as an evaluation method to measure the geometric relationship between measurement error and positioning error. Because the measurement error of each unit of the foundation navigation system is different and the influence of the user distance is not negligible, it is necessary to study the distance-related evaluation standard. Therefore, it is proposed to use WGDOP instead of GDOP as the criterion, and from the analysis of the variance of the foundation navigation system error, the WGDOP expression is analyzed in detail. By comparing the two positioning factors, the WGDOP is used as the foundation navigation system base station to set the evaluation standard and improve the accuracy. The results show that the weighted geometric accuracy factor can be used as the criterion to evaluate the actual use environment of the foundation navigation system, and the accuracy of the system positioning performance is improved.

**Keywords:** foundations navigation system; WGDOP; GDOP

## 0 引言

全球定位系统 (GPS) 是美国国防部为了满足军方和民用领域对实时、连续、精确导航的需求所提出的方案, 它基于人造卫星, 是面向全球的全天候无线定时、定位系统。卫星导航系统由于具有覆盖范围广、全天候全天时、用户数量无限制等优点, 被作为世界范围内首选的定位导航授时手段。但它的使用具有一定局限性, 在一些特定使用场景下, 如室内、山谷或高楼林立区, 由于信号的物理特性、星座布局和环境等影响因素, 导致卫星定位系统产生定位精度不佳、卫星遮挡严重、完好性和可靠性较差、信号功率较弱、抗干扰能力不足等问题<sup>[1-3]</sup>。

为了解决以上问题, 大量学者提出使用伪卫星对卫星导航系统性能进行增强。随着导航定位领域的科学技术的飞速发展, 新型地基导航系统也被提出, 该系统最早被澳大利亚的 Locata 公司提出, 其最大的优势在于: 不依赖于原子钟以及外部辅助, 仅利用站间精确时间同步技术即可使网内的基准站达

到亚 ns 级的时间同步, 从而可以完全独立于卫星导航系统工作, 以达到增强卫星导航系统的目的<sup>[4]</sup>。

在定位导航系统中, 系统定位精度代表系统解算位置结果与用户实际位置结果之间的差异, 而精度评估则是判断解算值与真值一致的离散程度。测量误差和几何精度因子 (GDOP) 是影响卫星导航系统定位精度的两大重要因素, 其中, 测量误差与系统性能有关, 而几何精度因子 GDOP 的大小依赖于星座 (基站) 布局的好坏。在测量误差一定的情况下, 定位系统的定位精度主要取决于系统星座分布情况。针对全球卫星定位系统, 由于其卫星几乎处于同一轨道高度, 一般假设所有伪距测量误差相互独立, 具有相同零均值且均方根相等, 进而使用几何定位因子 (GDOP) 对系统进行定位精度评估。

地基导航系统与卫星导航系统类似, 其定位精度也可表达成测量误差和精度因子相乘的形式, 但是地基导航系统与卫星导航系统布局方案的最大区别在于: 地基导航系统基站完全布设于地面上, 用户到各基站的距离变化较大, 导致对各基站的伪距测量误差存在显著差异, 并不能够视为相同。因此使用传统定位因子 GDOP 对地基导航系统进行布局可能并不适用, 因此还需对加权几何精度因子 (WGDOP) 进行研究, 从而得到使系统定位精度更准确的定位精度评估方法。

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-06-01。

作者简介: 杨楠 (1992-), 女, 天津市人, 硕士研究生, 主要从事地基导航基站布局方向的研究。

对于不同类型卫星组成的北斗导航系统以及不同导航系统组成的组合系统（如 GPS/GLONASS 组合系统），进行定位时由于不同的误差导致对卫星单元影响不同，从而测距精度也不相同，若使用假设观测值具有相同测量误差的几何精度（GDOP）评价方法，则不能客观表示定位精度。因此加权精度因子在一些文献中被提出。

本文通过分析适用于地基导航系统的 WG Dop 表达式，并通过仿真实验对 GDOP 及 WG Dop 两种评价方法进行分析比较，从而选择更加准确的方法对系统进行定位精度评估。

### 1 地基导航系统定位原理

地基导航系统若想实现定位，则必须先解决接收机的两个问题，一是确定各基站在空间中的准确位置，二是得到从基站到接收机的精确距离。解决以上两个基础必备问题后，就可采用伪距定位原理，对用户接收机位置进行精确定位。

与卫星导航系统相似，地基导航系统也采用伪距实现定位、定时的基本原理：接收机通过内部码跟踪环路上的 C/A 码发生器和 C/A 码相关器获得测距码相位（CP），与解调出的各基站导航电文数据码结合，得出接收机与该基站的伪距测量值  $\rho^{(n)}$ 。该测量值并不代表接收机与基站的几何距离。

不同于卫星导航系统，地基导航系统基站导航信号不经过电离层，因此考虑基站、接收机分别与系统时间存在钟差  $\delta_{i_s}$ 、 $\delta_{i_u}$ ，以及折射效应导致电磁波在大气中传播存在的传播时延，可得伪距观测方程为：

$$\rho = r + c(\delta_{i_u} - \delta_{i_s}) + T + \epsilon_p \tag{1}$$

其中： $r$  为用户接收机与基站的几何距离； $T$  为对流层延迟对应的距离量； $\epsilon_p$  为伪距测量噪声。

地基导航系统定位原理如图 1 所示，定义误差校正后的伪距测量值表达式如下：

$$\sqrt{(x^{(n)} - x)^2 + (y^{(n)} - y)^2 + (z^{(n)} - z)^2} + c \cdot \delta_{i_u} = \rho^{(n)} \tag{2}$$

其中： $(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$  为基站  $n$  空间位置坐标， $(x, y, z)$  为用户接收机位置坐标。

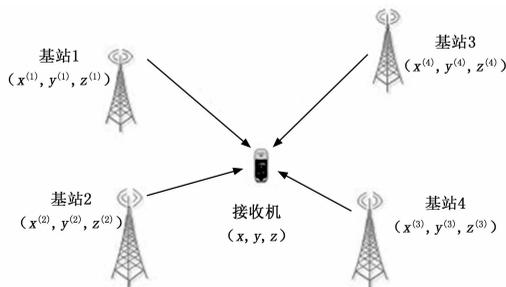


图 1 地基导航系统定位原理

从而，地基导航系统定位定时算法的本质就是求解由用户三维位置坐标及钟差 4 个未知数组成的一个四元非线性方程组：

$$\begin{cases} \sqrt{(x^{(1)} - x)^2 + (y^{(1)} - y)^2 + (z^{(1)} - z)^2} + c \cdot \delta_{i_u} = \rho^{(1)} \\ \sqrt{(x^{(2)} - x)^2 + (y^{(2)} - y)^2 + (z^{(2)} - z)^2} + c \cdot \delta_{i_u} = \rho^{(2)} \\ \vdots \\ \sqrt{(x^{(N)} - x)^2 + (y^{(N)} - y)^2 + (z^{(N)} - z)^2} + c \cdot \delta_{i_u} = \rho^{(N)} \end{cases} \tag{3}$$

### 2 地基导航系统布局评价准则

大量学者在研究过程中，为了准确评价伪卫星导航定位系统布局方案的优劣及定位性能的精度大小，提出了很多用来评价导航系统布局对定位精度影响的方法，比如几何精度因子（GDOP）法——用来直观显示系统布局对定位精度的影响；克拉美-罗下界（CRLB）法——主要用来解决高斯平稳信号的估计问题；均方误差及均方根误差（MSE）法——用来表明参数真值与参数估计值之差的平方的期望值；圆/球误差概率率（CEP）法——用来表示以误差均值为中心，随机矢量为半径的圆。其中，因为精度因子计算较为简单且表现较为直观，常被直接用来衡量系统基站布局对定位精度的影响。

#### 2.1 几何精度因子（GDOP）

根据参考文献 [5] 中对定位误差协方差进行的分析，可以发现系统定位误差等于接收机测量误差乘以一个放大倍数，导航学将该与系统星座（基站）几何布局有关的定位误差放大倍数定义为几何精度因子（GDOP），它代表系统测量误差引起的基站（星座）到用户接收机之间距离偏差的放大倍数。由于 GDOP 只与星座几何分布有关，因此常被用来评价系统星座（基站）布局的优劣。

在制定系统布局方案中，GDOP 通常被用于从所有星座（基站）中选出使系统定位精度最高的布局方案，或者通过对基本几何图形进行 GDOP 分析，从而得到地面基站的一般布局方法。该评价方案以所有基站（星座）的测量量具有相同的测量误差为前提，通过遍历所有可用基站的布局方案，得到拥有最小精度因子（GDOP）的几何布局方案，从而利用该最优布局方案进行最精确的定位。

定义  $(x, y, z)$  和  $(X_i, Y_i, Z_i)$  分别为用户和基站  $s_i$  的坐标。 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  代表用户坐标的估计结果。为简化对定位精度的分析，做出以下两点假设：1) 各站测量误差服从相同正态分布，且均值为 0，方差相等；2) 不同站间测量误差互不相关；3) 各站得到的测量误差方差视为相等。从而可得精度因子表达式为：

$$GDOP = \sqrt{\text{tr}(G^T G)^{-1}} \tag{4}$$

其中：

$$G = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & 1 \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$e_{i1} = \frac{\hat{x} - X_i}{\hat{r}_i}, e_{i2} = \frac{\hat{y} - Y_i}{\hat{r}_i}, e_{i3} = \frac{\hat{z} - Z_i}{\hat{r}_i} \tag{6}$$

$$\hat{r}_i = \sqrt{(\hat{x} - X_i)^2 + (\hat{y} - Y_i)^2 + (\hat{z} - Z_i)^2} \tag{7}$$

该评价标准表明，在定位误差不变的条件下，GDOP 值越小，定位精度越高，基站（星座）布局越合理。除了 GDOP，根据实际场景的不同需求，还可选择 PDOP（空间位置精度因子）、HDOP（水平位置精度因子）、VDOP（高程精度因子）、TDOP（时间精度因子）。

不难发现，在 GDOP 推导过程中，需要将各卫星（基站）测量值的测量误差视为相等。在实际中，接收机需要根据基站（星座）仰角高低和接收机跟踪环路的运行状态以及信号强弱等因素，对不同时刻的不同测量值进行估算，而不能视为全部相等。

由于在卫星导航系统中, 卫星与用户距离很远, 星座仰角及信号强弱等变化不大, 故可使用该评价标准。然而, 在地基导航系统应用环境中, 由于基站布设于地面或者近地面, 各基站到用户的距离明显不同, 导致基站信号的强弱等不同, 从而每个测量值通常具有不同的测量误差方差, 故上述 GDOP 求解方法中的假设 (3) 不再适用。

## 2.2 加权几何精度因子 (WGDP)

在一些同类型星座或组合星座组成的定位系统中, 计算几何精度因子时应用较多的方法是假设所有星座测得的伪距测量误差是相互独立且相等的拥有零均值的均方根值。然而实际中, 每一时刻不同星座具有不同的伪距测量误差, 参考文献 [6] 中针对该实际情况提出, 在对组合定位系统进行定位精度评价误差时使用加权几何精度因子进行评价的观点, 但是对单一定位系统并没有提出使用该方法的必要性, 并且文中加权几何精度因子的使用需以已知每一星座伪距测量误差和星座几何布局为前提。

地基导航系统由于其自身特殊的布设位置及信号特性, 需要在定位之前通过使用合适的评价方法, 选择最优的布局方案对系统基站进行位置摆放, 此时, 要在不能获得各基站伪距测量误差的前提下得到加权几何精度因子的表达式。加权几何精度因子的本质在于通过给予每个测量误差方差不同的权重分配, 来削弱误差大的结果对系统的影响。

假设: 1) 各站测量误差为相同正态分布, 且均值为 0, 方差相等; 2) 不同站间测量误差互不相关。则  $n$  基站的测距误差协方差矩阵为:

$$\text{Cov}(\Sigma_{\text{USER}}) = \mathbf{W}_n \cdot \sigma_{\text{USER}}^2 \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{W}_n = \text{diag}[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$  为  $n$  台基站均方根伪距误差的加权阵,  $\sigma_{\text{USER}}^2$  为固定主基站基准均方根伪距误差。通过对定位误差协方差矩阵的推导, 得到最小二乘法定位解算加权阵为  $\mathbf{W}_n^{-1}$ , 从而用户接收机空间坐标和钟差改正精度协方差矩阵为:

$$\text{Cov}(\Sigma_X) = (G^T \mathbf{W}_n^{-1} G)^{-1} G^T \cdot \mathbf{W}_n^{-1} \text{Cov}(\Sigma_{\text{USER}}) \cdot \mathbf{W}_n^{-1} \cdot G (G^T \mathbf{W}_n^{-1} G)^{-1} = (G^T \mathbf{W}_n^{-1} G)^{-1} \sigma_{\text{USER}}^2 \quad (9)$$

通过上述公式推导, 得出 WGDP 矩阵表达式为:

$$\text{WGDP} = \sqrt{\text{tr}(G^T \mathbf{W}_n^{-1} G)^{-1}} \quad (10)$$

为了更好地提高地基导航系统定位精度, 需要找到使得 WGDP 最小的布局方案, 若想使用 WGDP 代替 GDOP 值来进行定位精度评价, 需要对系统测量误差进行观测量建模, 从而得到加权几何精度因子表达式当中的加权矩阵  $\mathbf{W}_n$ 。

## 2.3 伪距误差及加权矩阵计算

根据 2.2 节对 WGDP 表达式的推导, 使用加权精度因子对系统进行评价的前提是获得加权矩阵  $\mathbf{W}_n$ , 而  $\mathbf{W}_n$  只与地基导航系统伪距测量误差有关。

### 2.3.1 伪距测量误差

地基导航系统伪距包括各种测量误差, 按照其来源不同可主要分为以下几个方面: 1) 与基站有关的误差: 站间时间同步时钟误差; 2) 与信号传播有关的误差: 大气层延迟误差, 由于地基导航系统信号不通过电离层, 因此只有对流层延迟误差; 3) 与接收机有关的误差: 接收机由于地点的不同, 会受到不同程度的多路径效应及电磁干扰, 同时还包括接收机自身噪声。

由于地基导航系统通过基于双向测距的时间同步方法, 可实现优于 1ns 的时间同步精度, 因此可忽略时间同步时钟误差带来的影响。通过对地基导航系统模型进行大气延迟误差修正

以及慎重选择基站布设位置后, 伪距测量误差将主要取决于接收机自身噪声误差。

### 2.3.2 接收机噪声均方差 $\sigma_{\text{DLL}}$ 表达式

在不考虑上述其他干扰的情况下, 接收机伪距测量误差源主要包括由热噪声所致的码相位抖动和动态应力误差两部分。接收机热噪声主要指天线、放大器和各部分电子器件的热噪声、卫星间的互相关性等, 其噪声具有随机性。根据相干点积功率法, 可得接收机噪声均方差表达式为:

$$\sigma_{\text{DLL}} = \sqrt{\frac{B_L D}{2 \cdot C/N_0}} \quad (11)$$

其中:  $B_L$  为噪声带宽,  $D$  为前后相关器间距,  $N_0 = kT$ ,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为噪声温度, 单位开尔文。

从而, 近似得到各个基站测量误差方差表达式为:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{B_L D}{2 \cdot C/N_0}} \quad (12)$$

### 2.3.3 加权矩阵 $\mathbf{W}_n$

取不同基站测得的测量误差方差为  $\sigma_i^2$ , 令  $\sigma_{\text{USER}}^2$  为固定主基站基准均方根伪距误差, 且该基站与用户距离为  $d_1$ , 其余基站与用户距离为  $d_i$ 。

由自由空间传播损耗公式可知:

$$\sigma_i^2 = \frac{B_L D}{2C/N_0} = \frac{B_L D N_0}{2(P_T + 20 \lg(\frac{\lambda}{4\pi d_i}))} \quad (13)$$

根据变量值的大小, 对比例进行等式近似, 得:

$$\frac{\sigma_i^2}{\sigma_1^2} = \frac{\frac{P_T + 20 \lg(\frac{\lambda}{4\pi d_1})}{N_0}}{\frac{P_T + 20 \lg(\frac{\lambda}{4\pi d_i})}{N_0}} \approx \frac{\lg(\frac{\lambda}{4\pi d_1})}{\lg(\frac{\lambda}{4\pi d_i})} \approx \frac{\lg(4\pi d_i)}{\lg(4\pi d_1)} \quad (14)$$

从而得到加权矩阵  $\mathbf{W}_n$  的表达式为:

$$\mathbf{W}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\lg(4\pi d_1)}{\lg(4\pi d_2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\lg(4\pi d_1)}{\lg(4\pi d_n)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

## 3 计算机仿真

### 3.1 GDOP 布局评价法

针对四基站情况进行仿真, 选取 4 个基站坐标分别为 A1 (0, 0, 1), A2 ( $\sqrt{3}$ , 1, 0.5), A3 ( $-\sqrt{3}$ , 1, 0.6), A4 (0, -2, 0.7), 单位为 km, 四基站位置如图 2 所示, 选取地面一点作为用户位置, 高度为 0 km, 同时以 0.01 km 的步进值使用 GDOP 法对该布局进行定位精度评价, 结果如图 3 所示。

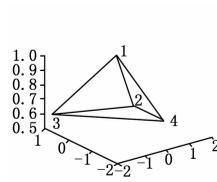


图 2 基站位置

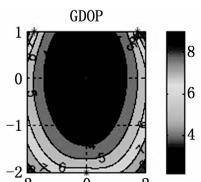


图 3 GDOP 值

针对上述布局方案, 分别统计区域内 GDOP 值小于 3、4、5、6 的区域所占总面积的百分比, 结果如表 1 所示。从表中

可得, 当按照传统  $GDOP$  对该定位布局进行评价时, 显示会有 46.9% 的待定位区域可达到  $GDOP$  值小于 4, 最小值可达 2.2142, 然而该评价方法并未考虑到基站与用户的距离对定位精度的影响。

表 1  $GDOP$  覆盖范围

$GDOP$ 覆盖范围					
$GDOP$	$GDOP < 3$	$GDOP < 4$	$GDOP < 5$	$GDOP < 6$	$GDOP / \min$
覆盖比例	21.13%	46.90%	67.74%	85.76%	2.2142

### 3.2 $WGDOP$ 布局评价法

#### 3.2.1 主基站的选取

公式 (10)  $WGDOP$  算法需要确定一个主基站, 从而得到与该主基站有关的加权矩阵。为了探讨主基站的位置, 对以下几种四基站情况进行仿真。

如图 2, 用户位于地面, 高度为 0, 以 0.01 的步进值, 分别选取 4 个基站作为主基站进行实验仿真, 结果如图 4 所示。

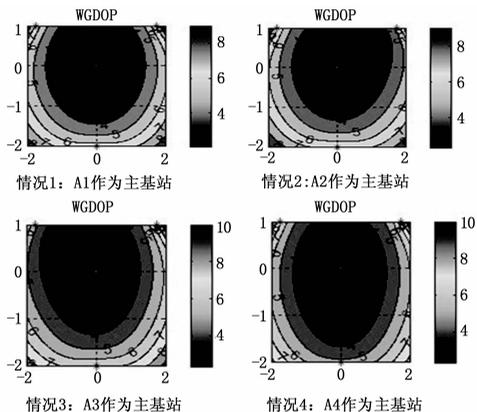


图 4 4 种情况下  $WGDOP$  分布图

仿真结果显示, 当以区域中心处基站作为主基站时, 区域精度因子相对较好, 因此选取布设在区域中心附近的基站 (如上例中 A1 站) 为主基站。更多基站布局时, 仍按该原则选取主基站位置。

#### 3.2.2 $WGDOP$ 仿真结果

针对将 A1 作为主基站方案, 分别统计区域内  $WGDOP$  值小于 3、4、5、6 的区域所占比例, 如表 2 所示, 故知, 当按照  $WGDOP$  对该定位布局进行评价时, 中心区域的精度因子值变化较大, 低值覆盖区域面积增加。对于外围精度因子较大区域, 并无太大区别, 相较于  $GDOP$  评价方法, 该评价方法特点在于考虑到基站与用户的距离对定位精度的影响。

表 2  $WGDOP$  覆盖范围

$WGDOP$ 覆盖范围					
$WGDOP$	$WGDOP < 3$	$WGDOP < 4$	$WGDOP < 5$	$WGDOP < 6$	$WGDOP / \min$
覆盖范围	24.77%	49.38%	69.67%	86.93%	2.068

### 3.3 定位仿真实验

针对前文基站布局, 对系统加入测量误差, 测量误差方差为 0.0087, 定位解算结果为 (1.1639, 0.0084, -0.1705), 实际位置为 (1, 0, 0), 定位误差方差为 0.0187, 该点  $GDOP=2.2142$ ,  $WGDOP=2.1705$ , 经仿真验证, 测量误差方差乘以  $WGDOP$  的值更接近于真实定位误差方差。

### 3.4 $GDOP$ 与 $WGDOP$ 仿真结果对比分析与结论

在上述布局方案下, 选取用户活动范围内的四点位置, 分别使用两种评价方法对其进行评价, 结果如表 3。

表 3  $GDOP$  与  $WGDOP$  定点值比较

用户处 $GDOP$ 与 $WGDOP$ 值比较						
用户坐标	(-1, 0, 0)	(0.5, -0.5, 0)	(-0.5, -0.5, 0)	(0, -0.5, 0)	区域内因子最小值	因子值 < 3 覆盖范围
$GDOP$	3.1327	2.7129	2.6792	2.4395	2.2142	21.13%
$WGDOP$	3.1082	2.7058	2.6514	2.4241	2.0685	24.77%

实验 2.3 得出, 使用  $WGDOP$  对系统定位进行评价, 更加符合实际定位结果, 评判更加合理。综合表 1、2、3, 该定位布局中心区域的  $WGDOP$  计算的高精度因子 (<3) 覆盖比  $GDOP$  多出 3.64%, 存在显著差别, 值相较于  $GDOP$  值变化较大。在区域内定点精度分析上, 根据实际情况中, 进行定位时, 不希望大误差测量值对结果有较大影响, 故对各站测量误差进行权重分配, 减小大测量误差权重, 使得  $WGDOP$  值应小于该点  $GDOP$  值, 实验结果表明该理论分析正确, 因此可以得到  $WGDOP$  权重分配与用户到基站距离的相关性: 对于与用户距离小的基站测量误差方差, 加权矩阵给予大权重, 而对于与用户距离大的基站测量误差方差, 则给予小权重。相较于  $GDOP$  评价方法, 该评价方法最大的特点就是考虑到根据基站与用户的距离对测量误差方差进行权重分配, 从而使评价标准更加贴合实际情况, 为基站布局提供更准确的评价准则。因此, 采用  $WGDOP$  进行布局评价更加合理。

## 4 总结

在地基导航系统中, 由于基站到用户距离差异很大, 导致基站所产生的测量误差不同, 因此在对定位误差进行分析时, 应考虑距离因素, 而加权几何精度因子 ( $WGDOP$ ) 相较于传统几何精度因子, 选取了与距离相关的加权矩阵作为新的衡量标准, 从分析地基导航系统误差方差入手, 对  $WGDOP$  表达式进行详细分析, 通过系统比较两种定位因子, 得出在中心区域距离主基站相对近的区域,  $WGDOP$  与  $GDOP$  有明显差异, 说明采用  $WGDOP$  作为地基导航系统基站布设评价标准, 可以更直观地表示出精度因子与用户距基站距离之间的相关性, 准确性高、更加贴合实际情况。研究结果表明, 采用加权几何精度因子作为评价标准, 可以更加符合地基导航系统的实际使用环境, 并且可以提高精度评价的准确性。

#### 参考文献:

- [1] 何秀凤, 桑文刚, 杨光. 伪卫星增强 GPS 精密定位新方法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2005, 35 (5): 460-464.
- [2] 王晖辉, 李实, 王辉, 等. 地面伪卫星测试环境中关于精度因子的仿真研究 [J]. 测绘通报, 2009, 8: 6-9.
- [3] 彭瑞雪, 胥霖, 王富. 伪卫星定位系统中组网布局研究 [J]. 兵工自动化, 2010, 29 (8): 53-56.
- [4] Guo X, Zhou Y, Yang J. Research on Time Synchronization Method of Ground-Based Navigation System [A]. CSNC 2015 Proceedings, Volume I. Lecture Notes in Electrical Engineering [C]. Springer Berlin Heidelberg, 2015, 340: 529-536.
- [5] 宋倩, 张波, 李署坚. 地面伪卫星组网布设技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 199-202.
- [6] Chen C S. Weighted geometric dilution of precision calculations with matrix multiplication [J]. Sensors, 2015, 15, 803-817.