

无源测距定位系统设计中的 GDOP 分析

王好同¹ 马 钰² 李伟明² 张兵强¹ 方 伟¹

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001; 2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东烟台 264001)

摘 要: 几何精度因子 (GDOP) 是衡量一个定位系统精度的重要标准之一。为分析三维空间中 GDOP 随几何位置关系的变化, 构建了 GDOP 分析模型。对 GDOP 的解算算法和典型四基站三维无源定位系统的分析表明, 测距精度最终导致的定位精度会随着用户处于不同的相对几何位置而产生明显波动和规律变化。在以球体作为几何参考体的情况下, GDOP 在不同“经线”或“纬线”上会出现不同程度的波动或近似为常数; 延径向向外 GDOP 不断增大; 基站点处出现 GDOP 的间断点。这些分析结果可以作为用户选择基站或操作区域的基本判据, 并可为无源测距定位系统基准站点的布设提供参考。基站周边应当设定适当的保护距离以保持用户的定位精度; 用户应当尽可能在参考几何体内部运动; 在系统设计中, 应当充分考虑用户的活动区域等限制因素。

关键词: 几何精度因子分析; 三维; 无源测距定位系统; 几何相对距离

中图分类号: TN96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2012)01-0124-07

Analysis of GDOP in the Passive-ranging Positioning System Design

WANG Hao-tong¹ MA Yu² LI Wei-ming² ZHANG Bing-qiang¹ FANG Wei¹

(1. Department of Electronic & Information Engineering, The Naval Aeronautical and Astronautical University, Yan Tai 264001, China; 2. Graduate Students' Brigade, The Naval Aeronautical and Astronautical University, Yan Tai 264001, China)

Abstract: Geometric dilution of precision (GDOP) is one of the most important factors for judging whether a positioning system is of high-accuracy. An analysis model of GDOP is constructed, which can help to analyze the variations of GDOP going with the changes of geometrical position in the three-dimensional space. With the analysis of both calculation arithmetic of GDOP and typical 3-dimensional passive-ranging positioning system of 4-stations, we get that positioning accuracy, of which the ranging accuracy is the root, will obviously fluctuate and regularly change following the variations of user's position. Using a sphere as the geometrical reference, GDOP will fluctuate variously or be almost constant at different "longitudes" and "latitudes", increase along a radial, and be discontinuous near a base station. These results could provide useful information for the users to select the stations and work area, which also can give the designers of passive-ranging positioning system some advices about deploying stations. Firstly, for the purposes of maintaining a proper positioning accuracy, safe distance should be suggested around the stations. Besides, the users should stay in the reference geometry, if possible. At last, in the beginning of a design, the factors, such as the limit of users' location region, should be taken into account.

Key words: analysis of geometric dilution of precision; three-dimensional; passive-ranging positioning system; geometric relative distance

1 引言

几何精度因子在导航定位系统中有着广泛应用。

无线传感器网络中, GDOP 是位置估计中考虑的重要因素之一^[1]; 无线定位系统中, 基站间不同的几何分布方式对用户定位误差将具有不同的影响^[2,3]; GDOP 也

是选择基站的重要因素^[4,5];在采用 TDMA 接入技术的无源定位导航系统中,用户通过合理选择基站源,监听它们报告的位置信息,就可以实现自身的相对定位和导航功能,其中 GDOP 是限制导航定位性能的核心因素之一^[6,7]。在高精度定位系统中要求精确的距离测量和在待定位用户和测量基站之间具有良好的几何关系,因此将 GDOP 定义为定位精度与距离测量精度的比值。

在不同应用背景下,建立适当的 GDOP 分析模型,可为用户提供更好的导航定位服务。刘会杰等根据 GDOP 的定义研究了最优定位星的问题^[8];邵良琪等人在某有源测距导航定位系统中,实现了在 DSP 上计算 GDOP^[9];丛丽等分析了卫星导航中 GDOP 的影响因素和具体应用情况^[10];Shing H. Doong 研究了在使用 4 颗卫星定位中一种高效计算 GDOP 的方法^[11]。本文针对无源测距定位系统中 GDOP 的算法分析和仿真结果进行了研究。

2 GDOP 计算

在 TDMA 接入方式下,用户通过不断接收定位基准(称为基站)的位置消息,和测量消息的到达时刻(Time of arrival, TOA),就可以得到用户自身相对于基站的测量距离(伪距)。因此,可假设测量模型为

$$r_i = |P - P_i| + C \cdot \xi$$

$$= \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + C \cdot \xi \quad (1)$$

其中, $i=1, 2, \dots, N$; r_i 是平台自身相对于第 i 个基站的距离测量值; P 是单元自身外推的相对位置值,用三维坐标表示为 (x, y, z) ; P_i 是第 i 个基站报告的位置值,用三维坐标表示为 (x_i, y_i, z_i) ; C 是光速; ξ 是到达时间测量的定时偏差,且与基站相互独立。注,此时测量模型是为进行 GDOP 分析而建立的,其中没有考虑基站和待定位用户相对于系统时间的同步偏差。假设得到的位置坐标估计误差分别为 Δx 、 Δy 和 Δz , 并且测量噪声误差为 $\Delta \xi$, 那么对应的伪距误差可近似表示为

$$\Delta r_i \approx \frac{\partial r_i}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_i}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_i}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_i}{\partial \xi} \Delta \xi$$

$$= \alpha_i \Delta x + \beta_i \Delta y + \gamma_i \Delta z + C \cdot \Delta \xi \quad (2)$$

其中 $\alpha_i = (x-x_i)/r_{mi}$; $\beta_i = (y-y_i)/r_{mi}$; $\gamma_i = (z-z_i)/r_{mi}$; $r_{mi} = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$, 表示测试点到基站的距离。注,(2)式是(1)式 Taylor 展开中忽略高阶项的

近似表达式。用矩阵表示可记为 $\mathbf{A}\mathbf{X}=\mathbf{B}$, 其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & C \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_N & \beta_N & \gamma_N & C \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \xi \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta r_1 \\ \vdots \\ \Delta r_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

当基站的数量 N 大于等于 4 时,可得到 \mathbf{X} 的最小二乘解 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}$ 。根据中心极限定理,可假设伪距测量偏差服从 Gauss 分布,满足 $E[\Delta r_i] = 0$, $E[\Delta r_i \Delta r_j] = 0 (i \neq j)$, $E[\Delta r_i^2] = \sigma_r^2$ 。因此,

$$\Delta x = [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,1} \sum_{i=1}^N \alpha_i \Delta r_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,2} \sum_{i=1}^N \beta_i \Delta r_i$$

$$+ [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,3} \sum_{i=1}^N \gamma_i \Delta r_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,4} \sum_{i=1}^N \Delta r_i$$

$$= \sum_{i=1}^N \rho_i \Delta r_i \quad (4)$$

其中, $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$; $\tilde{\mathbf{A}}^+$ 为 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的满足 Moore-Penrose 全部方程的广义逆矩阵;

$$\rho_i = [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,1} \alpha_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,2} \beta_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,3} \gamma_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{1,4} \quad (5)$$

这里采用广义逆是因为在三维 GDOP 计算过程中 $\tilde{\mathbf{A}}$ 存在奇异点,采用最小二乘解往往导致非唯一特性,给分析结果带来不稳定因素;但是 $\tilde{\mathbf{A}}^+$ 广义逆矩阵将导致极小最小二乘解,且具有唯一性等良好性质,所以采用广义逆计算 GDOP 值。因此

$$E[\Delta x] = E\left[\sum_{i=1}^N \rho_i \Delta r_i\right] = \sum_{i=1}^N E[\rho_i \Delta r_i] = \sum_{i=1}^N \rho_i E[\Delta r_i] = 0,$$

$$\sigma_x^2 = E[\Delta x^2] = E\left[\left(\sum_{i=1}^N \rho_i \Delta r_i\right)^2\right] = E\left[\sum_{i=1}^N (\rho_i \Delta r_i)^2\right]$$

$$= \sigma_r^2 \sum_{i=1}^N \rho_i^2 \quad (6)$$

由此可以看出位置 x 坐标偏差的方差 σ_x^2 是伪距测量偏差的方差 σ_r^2 和几何位置关系表征量 ρ_i 的函数。考虑到 σ_r^2 为常数,因此 σ_x^2 仅是 ρ_i 的函数。同理可求得坐标 y 和坐标 z 的位置偏差满足

$$E[\Delta y] = 0, E[\Delta z] = 0,$$

$$\sigma_y^2 = E[\Delta y^2] = \sigma_r^2 \sum_{i=1}^N \kappa_i^2,$$

$$\sigma_z^2 = E[\Delta z^2] = \sigma_r^2 \sum_{i=1}^N \lambda_i^2 \quad (7)$$

其中

$$\kappa_i = [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{2,1} \alpha_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{2,2} \beta_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{2,3} \gamma_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{2,4} \quad (8)$$

$$\lambda_i = [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{3,1} \alpha_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{3,2} \beta_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{3,3} \gamma_i + [\tilde{\mathbf{A}}^+]_{3,4} \quad (9)$$

综上所述,将 GDOP 定义为

$$\text{GDOP} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}{\sigma_r^2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\rho_i^2 + \kappa_i^2 + \lambda_i^2)} \quad (10)$$

而且当 $\tilde{\mathbf{A}}$ 可逆时,常数 $C \neq 0$ 对 GDOP 的计算结果无影响;但是当 $\tilde{\mathbf{A}}$ 不可逆时,由于计算机的计算精度、存储数值的有效位数限制,以及求解广义逆过程等因素,使得 GDOP 会受到常数 C 的影响,此时需要合理的选取常数 C 使得计算结果有效。由于 C 值的改变并不影响几何位置关系,只是对测量模型中的误差项系数进行了修正,所以在固定 C 值情况下得到的 GDOP 分析仍然是有意义的。

3 三维无源测距定位系统

对于在空间内运动的用户而言,定位基准一般选取为具有较高位置精度的地面固定基站。本节分析表明,用户在定位基准构成的几何球体内部具有较好的几何位置关系,因此在建立定位系统时应当尽可能使参考几何体覆盖整个用户的运动区域。在这里主要讨论典型的正方形四基站 GDOP 分析^[12],对于更加一般的分布方式可采用类似分析方法。

3.1 基于几何体表面的 GDOP 分析

考虑 $N=4$ 个基站均匀分布在同一个圆环上时,文献[13]指出在二维平面上圆心位置 GDOP 具有最小值,圆边界上具有最大值。在三维空间的情况下,可以通过坐标旋转将处于同一平面的 4 个基站变换到 $x-y$ 坐标平面中且使圆心与坐标原点重合。采用球体作为参考几何体时,可得到如图 1 所示的典型情况。这里采用球体作为参考几何体,是因为其几何关系描述简洁且理论分析简便。

当用户位于圆球上一点时可得 $\alpha_i = -\cos \theta_i$; $\beta_i = -\cos \omega_i$; $\gamma_i = -\cos \eta_i$ ($i=1,2,3,4$)。由向量夹角的定义可知,

$$\alpha_1 = -\cos \theta_1 = \frac{\sin \phi \cos \varphi - 1}{\sqrt{2} \sqrt{1 - \sin \phi \cos \varphi}} \quad (11)$$

$$\beta_1 = -\cos \omega_1 = \frac{\sin \phi \sin \varphi}{\sqrt{2} \sqrt{1 - \sin \phi \cos \varphi}} \quad (12)$$

$$\gamma_1 = -\cos \eta_1 = \frac{\cos \phi}{\sqrt{2} \sqrt{1 - \sin \phi \cos \varphi}} \quad (13)$$

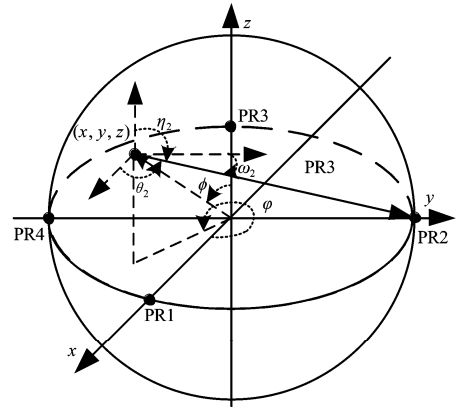


图1 基站位于同一圆环上
Fig. 1 Base stations are on a circle.

当 $i=2,3,4$ 时,可得类似结果,且都为 φ 和 ϕ 的函数。由式(2)可知,式(11)至式(13)中的 α_i 、 β_i 和 γ_i 是求解 GDOP 过程中的关键参数, θ_i 、 ω_i 和 η_i 是球面测试点指向第 i 个基站矢量与坐标轴矢量的夹角,关键参数与夹角之间成负余弦关系,且可由测试点所处参考几何体的相对位置(φ 、 ϕ)唯一决定。再适当选取模型参数 C ,即可得到所需的分析模型。基于此,可得

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 & \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_i & \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_i & C \sum_{i=1}^N \alpha_i \\ \sum_{i=1}^N \beta_i \alpha_i & \sum_{i=1}^N \beta_i^2 & \sum_{i=1}^N \beta_i \gamma_i & C \sum_{i=1}^N \beta_i \\ \sum_{i=1}^N \gamma_i \alpha_i & \sum_{i=1}^N \gamma_i \beta_i & \sum_{i=1}^N \gamma_i^2 & C \sum_{i=1}^N \gamma_i \\ C \sum_{i=1}^N \alpha_i & C \sum_{i=1}^N \beta_i & C \sum_{i=1}^N \gamma_i & NC^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 $N=4$;

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i^2 = 1 + \frac{\sin^2 \phi \cos^2 \varphi}{\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cos^2 \varphi} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i \gamma_i = \frac{\cos \phi \sin \phi \cos \varphi}{1 - \sin^2 \phi \sin^2 \varphi} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^4 \beta_i^2 = 1 + \frac{\sin^2 \phi \sin^2 \varphi}{\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \sin^2 \varphi} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^4 \gamma_i^2 = \frac{\cos^2 \phi (1 + \cos^2 \phi)}{(1 - \sin^2 \phi \sin^2 \varphi) (1 - \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^4 \beta_i \gamma_i = \frac{\cos \phi \sin \phi \sin \varphi}{1 - \sin^2 \phi \cos^2 \varphi} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i \beta_i = 0 \quad (20)$$

至此,可以得出 GDOP 在几何球体上的取值仅取决于其相对于球体的几何位置关系,计算结果如图 2 和图 3 所示。

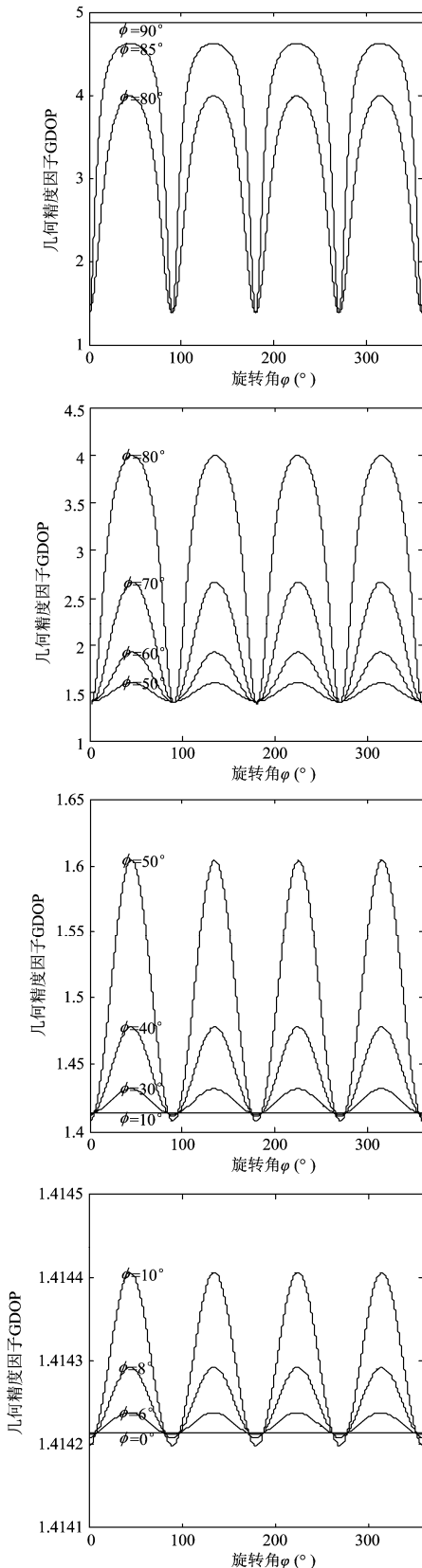


图 2 球面上不同“纬度”位置 GDOP 与旋转角 φ 的关系
Fig. 2 The relationship between GDOP and rolling angle of φ at different “latitudes”

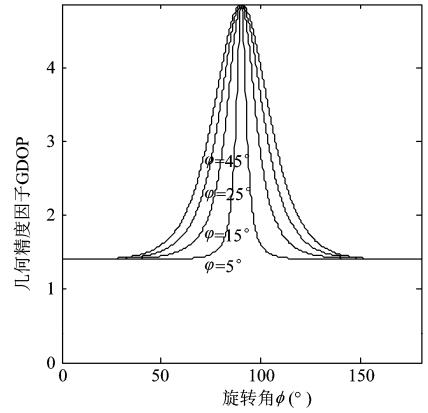


图 3 球面上不同“经度”位置 GDOP 与旋转角 ϕ 的关系
Fig. 3 The relationship between GDOP and rolling angle of ϕ at different “longitudes”

从图 2 和图 3 中可以看出,在高“纬度”(0°~30°)区域,相对几何位置关系随“经度”变化不大,GDOP 波动轻微(峰峰值较小);中、低“纬度”(40°~80°)区域 GDOP 波动(峰峰值)随纬度降低而变大;低“纬度”(80°~90°)区域 GDOP 开始趋向于常数。需要特别强调的是,在“赤道”(90°)上 GDOP 几乎等于常数,但是偏离“赤道”就会产生较强的波动;基站点处是 GDOP 的可去间断点。

在数学上 $\tilde{\mathbf{A}}^+$ 为 φ 和 ϕ 的复杂函数,解析表示十分困难。本文根据物理意义对计算结果加以说明和分析。由于基站在“赤道”上均匀分布且各个基站之间对用户而言是等价的,所以 GDOP 在同一“纬度”上呈现周期变化。当用户在同一“纬度”上顺时针运动时,用户越靠近基站则基站对 GDOP 的贡献越大,在基站的去心邻域内具有较低的 GDOP 值,随着远离基站 GDOP 值增加,相邻两基站等距处为 GDOP 的极大值点。在“极点”位置,由于只有一点,所以 GDOP 为一常数,不随旋转角变化;在赤道上类似于平面情况,但由于此时考虑了高度信息对 GDOP 的贡献,且 $\tilde{\mathbf{A}}$ 出现不可逆情况,并采用 $\tilde{\mathbf{A}}^+$ 计算 GDOP,因此得到的计算结果与文献[13]中所得二维情况下的分析结果数值上不同,但是它们都近似为常数,在这一点上是一致的。具体推到过程见文献[13]。

3.2 基于几何体径向的 GDOP 分析

在某一径向方向上,仍可采用与基站组成几何体的相对关系来描述用户的位置,但是为了简化问题和分析方便,引入几何相对距离的概念,即用户位置距几何体中心的距离与几何体标准参考距离的比值。当几何体为球形时,几何体中心为球心,标准参考距离为半径。假设球体的半径为 r ,用户与球心的距离为 s ,那么几何相对距离为 s/r ,记为 δ ,如图 4 所示。

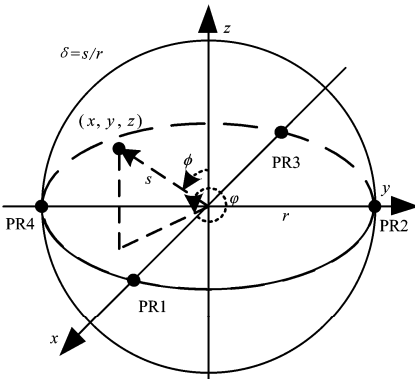


图4 几何相对距离示意图

Fig.4 Diagram of geometric relative distance

当用户从球心延径向运动时,可得

$$\alpha_1 = -\cos \theta_1 = \frac{\delta \sin \phi \cos \varphi - 1}{\sqrt{1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \cos \varphi}} \quad (21)$$

$$\beta_1 = -\cos \omega_1 = \frac{\delta \sin \phi \sin \varphi}{\sqrt{1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \cos \varphi}} \quad (22)$$

$$\gamma_2 = -\cos \eta_2 = \frac{\delta \cos \phi}{\sqrt{1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \cos \varphi}} \quad (23)$$

当 $i=2,3,4$ 时,可得类似结果,且都为 φ 、 ϕ 和 δ 的函数;同时, $\tilde{\mathbf{A}}$ 中的元素也均为 φ 、 ϕ 和 δ 的函数,满足

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i^2 = \frac{2(1 + \delta^2) - 2(3\delta^2 - \delta^4) \sin^2 \phi \cos^2 \varphi}{(1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \cos \varphi)(1 + \delta^2 + 2\delta \sin \phi \cos \varphi)} + \frac{2\delta^2(1 + \delta^2) \sin^2 \phi \cos^2 \varphi}{(1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \sin \varphi)(1 + \delta^2 + 2\delta \sin \phi \sin \varphi)} \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^4 \beta_i^2 = \frac{2\delta^2(1 + \delta^2) \sin^2 \phi \sin^2 \varphi}{(1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \cos \varphi)(1 + \delta^2 + 2\delta \sin \phi \cos \varphi)} + \frac{2(1 + \delta^2) - 2(3\delta^2 - \delta^4) \sin^2 \phi \sin^2 \varphi}{(1 + \delta^2 - 2\delta \sin \phi \sin \varphi)(1 + \delta^2 + 2\delta \sin \phi \sin \varphi)} \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^4 \gamma_i^2 = \frac{4\delta^2(1 + \delta^2) \cos^2 \phi (1 + \delta^4 + 2\delta^2 \cos^2 \phi)}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \alpha_i \beta_i &= \frac{2\delta^2(\delta^2 - 1) \sin^2 \phi \cos \varphi \sin \varphi}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)} + \frac{2\delta^2(\delta^2 - 1) \sin^2 \phi \cos \varphi \sin \varphi}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)} \\ &= \frac{4\delta^2(\delta^2 - 1) \sin^2 \phi \cos \varphi \sin \varphi (1 + \delta^4 + 2\delta^2 \cos^2 \phi)}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \alpha_i \gamma_i &= \frac{2\delta^2(\delta^2 - 1) \cos \phi \sin \phi \cos \varphi}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)} + \frac{2\delta^2(1 + \delta^2) \cos \phi \sin \phi \cos \varphi}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)} \\ &= \frac{4\delta^4 \cos \phi \sin \phi \cos \varphi (1 + \delta^4 + 2\delta^2 \cos^2 \phi)}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \beta_i \gamma_i &= \frac{2\delta^2(\delta^2 - 1) \cos \phi \sin \phi \sin \varphi}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)} + \frac{2\delta^2(1 + \delta^2) \cos \phi \sin \phi \sin \varphi}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)} \\ &= \frac{4\delta^4 \cos \phi \sin \phi \sin \varphi (1 + \delta^4 + 2\delta^2 \cos^2 \phi)}{((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \sin^2 \varphi)((1 + \delta^2)^2 - 4\delta^2 \sin^2 \phi \cos^2 \varphi)} \end{aligned} \quad (29)$$

式(21)至式(23)中的 α_i 、 β_i 和 γ_i 是求解 GDOP 过程中的关键参数, θ_i 、 ω_i 和 η_i 是空间中任意测试点指向第 i 个基站矢量与坐标轴矢量的夹角,关键参数与夹角之间依然成负余弦关系,且可由测试点所处参考几何体的相对位置(φ 、 ϕ 、 δ)唯一决定。选取模型参数 C 与球面分析时相同,即得到径向的分析模型。因此 GDOP 在几何球体径向上的取值也仅取决于其相对于球体的几何位置关系,计算结果如图5所示。

用户超出参考球体时,基站对用户的定位服务性能将逐渐减弱。考虑一种极端情况,当基站围成的区

域远远小于其相对于用户的距离时,任意基站对用户定位能力的贡献将近似于,同一方向上一个基站的性能,在三维定位中具有很差的几何位置关系。当用户位于几何球体内部时,基站可为用户在各个方向上提供较好的定位服务;当超出几何球体时,用户不能在所有方向上都有效地修正自己的位置误差,必将导致某一方向系统定位性能下降:在“赤道”正上方时,系统依然能够较好的为用户提供 x 轴和 y 轴方向上的定位服务,但是在 z 轴方向上的性能主要取决于与基站距离和基站数量等因素,性能随着距离的增加而减弱;在

接近“赤道”的径向上,用户一旦超出球体,那么系统在 x 轴、y 轴和 z 轴方向上的定位能力均将迅速减弱。从图 5 所示的计算结果可以看出,随着几何相对距离 δ 的增大 GDOP 也增加,且当 $\delta > 1$ 时,随着“纬度”的降低 GDOP 增加的速度也在加快。需要特别注意的是,在基站点处会出现跳跃间断点,这是由于对于伪距测量模型中位置信息的缺失造成的^[13]。

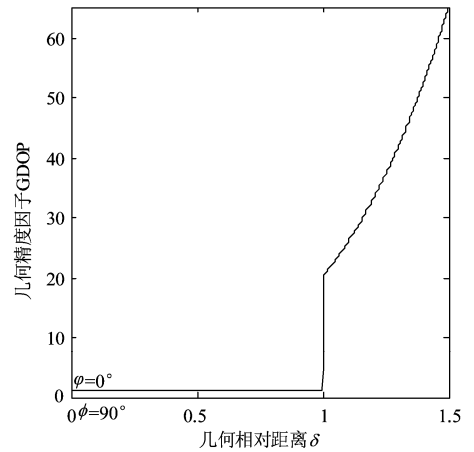
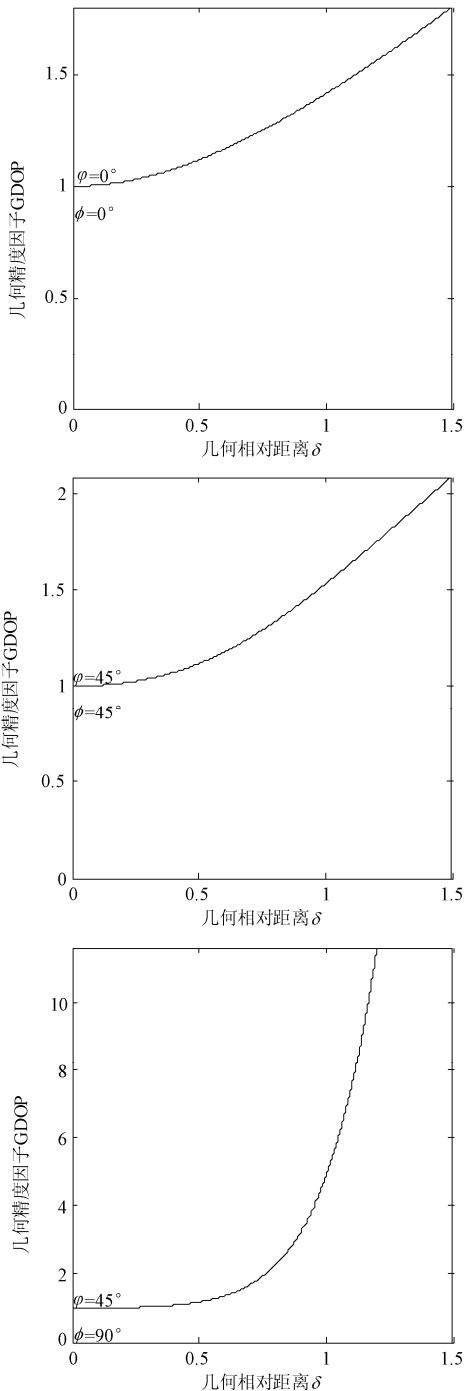


图 5 GDOP 随几何相对距离的变化
Fig. 5 The relationship between GDOP and geometric relative distance

4 结论

通过建立适当的参考几何体模型,分析 GDOP 与几何参数的变化规律,可以为无源测距定位系统设计提供基本依据。本文详细分析了四基站球形参考几何体定位系统中 GDOP 在球体表面和延径向的变化情况。分析表明,无源测距定位系统中的基站周边应当设定适当的保护距离以保持用户的定位精度;用户应当尽可能在参考几何体内部运动;在系统设计中,应当充分考虑用户的活动区域等限制因素。

参考文献

- [1] Lin-chih Chu, Po-Hsuan Tseng, and Kai-Ten Feng. GDOP-Assisted Location Estimation Algorithms in Wireless Location Systems [C] // Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. New Orleans, LO; IEEE, 2008; 1-5.
- [2] Wei Wang, Zhi-xin Deng and Guo-Qing Zhao. Research of Coastal Station Distribution Algorithm Based on GDOP in Wireless Positioning System [C] // Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. Harbin; 2007 IEEE. 2007; 3150-3154.
- [3] 顾晓婕, 王新民, 李文超. 多站时差无源定位探测器位置优化 [J]. 传感技术学报. 2011, 24(1): 93-99. GU Xiaojie, WANG Xinmin, LI Wenchao. Detector Position Optimization in TDOA Passive Location [J]. CHINESE JOURNAL OF SENSORS AND ACTUATORS. 2011, 24(1): 93-99. (in Chinese)
- [4] Wei-Han Su and Chih-Hung Wu. Support Vector Regression for GDOP [C] // 2008 Eighth International Confer-

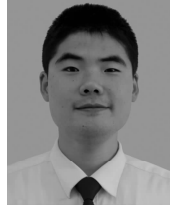
- ence on Intelligent Systems Design and Applications. 2008;302-306.
- [5] 黄金凤, 韩焱, 王黎明. 无源时差定位布站形式对定位精度的影响[J]. 火力与指挥控制. 2009, 34(10):33-35. HUANG Jin-feng, HAN Yan, WANG Li-ming. Influence of Passive Location System Station on Target Location Precision[J]. Fire Control & Command Control. 2009, 34(10):33-35. (in Chinese)
- [6] 田增山, 何维, 邢培基. 移动通信系统无源定位性能分析和比较[J]. 重庆邮电大学学报. 2009, 21(1):45-49. TIAN Zeng-shan, HE Wei, XING Pei-ji. Performance analysis and comparison of passive location in mobile communication system[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2009, 21(1):45-49. (in Chinese)
- [7] 沈文亮, 李艳斌, 陈卫东, 郝志安, 柏如龙, 魏华锐. 基于无源测距的快速定位方法研究[J]. 电子学报. 2009, 37(6):1343-1347. SHEN Wen-liang, Li Yan-bin, CHEN Wei-dong, HAO Zhi-an, BAI Ru-long, Wei Hua-rui. The Study of a Technology of Passive Measuring Distance Single Observer Fast Passive Location [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA. 2009, 37(6):1343-1347. (in Chinese)
- [8] 刘会杰, 张乃通. 基于 GDOP 的最优定位星座性能研究[J]. 高技术通信. 2000, 10(1):43-47. Liu Huijie, Zhang Naitong. Performance Research for GDOP Based Optimum Positioning Constellation [J]. HIGH TECHNOLOGY LETTERS. 2000, 10(1):43-47. (in Chinese)
- [9] 邵良琪, 李署坚, 邵定蓉. 某导航系统中基于 DSP 的几何精度因子 (GDOP) 计算 [J]. 测控技术. 2004, 23(z1):174-176.
- [10] 丛丽, Ahmed I Abidat, 谈展中. 卫星导航几何因子的分析和仿真[J]. 电子学报. 2006, 34(12):2204-2208. CONG Li, Ahmed I Abidat, TAN Zhan-zhong. Analysis and Simulation of the GDOP of Satellite Navigation [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA. 2006, 34(12):2204-2208. (in Chinese)
- [11] Shing H. Doong. A closed-form formula for GPS GDOP computation [J]. GPS SOLUTIONS. 2009, 13(3):183-190.
- [12] 张政超, 童力. 四站时差无源定位精度分析[J]. 中国电子科学研究院学报. 2010, 5(6):582-585. ZHANG Zheng-chao, TONG Li. Precision Analysis of Passive Location of 4-stations Based on TDOA [J]. Journal of CAEIT. 2010, 5(6):582-585. (in Chinese)
- [13] Ian Sharp, Kegen Yu, and Y. Jay Guo. GDOP Analysis for Position System Design [J]. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. 2009, 58(7):3371-3382.

作者简介



王好同(1958),男,出生于山东省烟台市。毕业于海军航空工程学院,获硕士学位,现为海军航空工程学院电子信息工程系副教授、硕士生导师,主要从事航空通信与导航研究。

E-mail:haotong_1958@126.com



马钰(1986-),男,出生于山西省寿阳县。毕业于海军航空工程学院,现为海军航空工程学院硕士研究生,主要从事数据链系统仿真研究。

E-mail:my7202359@126.com



李伟明(1985-),男,出生于河南省平顶山市。毕业于海军航空工程学院,现为海军航空工程学院硕士研究生,主要从事机载通信与导航设备仿真研究。

E-mail:511811416@qq.com

张兵强(1981),男,出生于河南省开封市。毕业于海军航空工程学院,获硕士学位,现为海军航空工程学院博士研究生,电子信息工程系讲师,主要从事虚拟现实、战场综合环境仿真研究毕业于海军航空工程学院。

E-mail:zbqwh1981@163.com

方伟(1977-),男,出生于安徽省蚌埠市。毕业于海军航空工程学院,获博士学位,现为海军航空工程学院电子信息工程系讲师,主要从事飞行仿真、雷达图像仿真、系统建模技术研究。E-mail:bluehawkfw@163.com