

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.08.017

## 伪卫星定位系统中组网布局研究

彭瑞雪<sup>1</sup>, 胥霖<sup>2</sup>, 王富<sup>1</sup>

(1. 装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 信息装备系, 北京 101416)

**摘要:** 为达到伪卫星在任一时间、地点都能对目标进行精确可靠定位, 对影响定位精度的关键技术—组网布局进行讨论。分析伪卫星及伪卫星定位系统的基本概念, 探讨影响组网布局的3个因素: 伪卫星定位系统的定位原理、伪卫星的“视距”范围和几何衰减因子。结果表明, 几何精度因子 GDOP 与被观测伪卫星所构成的四面体体积成反比。

**关键词:** 伪卫星; 伪卫星定位系统; 视距; DOP

**中图分类号:** N967.1 **文献标识码:** A

## Study of Configuration of Pseudo-Satellite Positioning System

Peng Ruixue<sup>1</sup>, Xu Lin<sup>2</sup>, Wang Fu<sup>1</sup>

(1. College of Graduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;

2. Dept. of Information Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** In order to achieve pseudo-satellites at any time and place can be accurate and reliable positioning of the target, this paper discusses one of the key techniques affecting the accuracy of positioning—the research on configuration. It analyzes the basic concept of pseudo-satellite and pseudo-satellite positioning system, discusses three elements which affect the configuration: the principle of positioning, line of sight range, the dilution of precision (GDOP). The results show that GDOP is inversely proportional to the tetrahedron volume posed by the observed pseudo-satellites.

**Keywords:** pseudo-satellite; pseudo-satellite positioning system; sight range; DOP

### 0 引言

伪卫星定位系统可辅助 GPS 导航定位、增强北斗导航定位等, 是提高定位精度的一种有效手段。近年来, 世界各国对伪卫星进行了很多研究, 韩国和芬兰都有较成熟的卫星组网系统。中国也有不少对伪卫星的研究, 但大多数是使用 1~2 个伪卫星实现卫星导航系统的区域增强, 几乎没有使用纯伪卫星组建系统实现独立定位的方法研究。为了在任何时候、任何地点, 即使在卫星不可见的情况下仍能精确可靠定位, 使得研究伪卫星定位系统关键技术问题显得更加迫切。故针对伪卫星定位系统组网布局进行研究。

### 1 概述

#### 1.1 伪卫星

伪卫星 (Pseudolite) 最早是指在地面上对处于研制阶段的 GPS 定位系统进行验证和试验的装置, Pseudolite 一词来源于 Pseudo-Satellite。在发射 GPS 卫星前, 研制人员就在地面利用伪卫星装置, 采用与 GPS 卫星结构完全相同的信号进行了试验<sup>[1]</sup>。由

于伪卫星装置类似于位置可以灵活放置的模拟 GPS 卫星, 因此在卫星数过少, 信号遮挡严重, 低仰角等不利观测条件下, 可通过改善 GPS 卫星星座结构, 较好地改善 GPS 卫星定位精度。其发射类似北斗的信号, 用该信号来增强和提高卫星定位系统的定位精度、完备性和有效性。伪卫星发射的信号类似于 GPS 信号, 具有测距的功能: 伪卫星能够提升整个系统的可用性、稳定性、可靠性以及测量精度, 甚至在室内、地下等无法接收到 GPS 卫星信号的情况下能完全替代 GPS 卫星。

#### 1.2 伪卫星定位系统

伪卫星定位系统是一个模拟 GPS 定位系统的区域定位系统, 基本理论和研究方法都源于 GPS, 可用 4 颗以上的 GPS 伪卫星作为信号源来模拟 GPS 系统中的卫星, 采用独立的坐标系和时间标准, 并用参考接收机和主控站完成系统的同步控制, 系统内的用户接收机负责接收伪卫星信号, 最终解算出接收机在信号区域中的位置。可利用通用 GPS 接收机接收信号并提取伪距等相关信息, 能给区域范围内定位并提高该区域内的定位精度。

收稿日期: 2010-02-30; 修回日期: 2010-04-16

作者简介: 彭瑞雪 (1984-), 女, 河北人, 在读研究生, 从事空间信息获取与处理研究。

目前，卫星导航系统以其可以全天候、实时为用户提供高精度的位置、速度和时间信息，在军事和民用上已得到了越来越广泛的应用，其作用和地位也在与日俱增<sup>[2]</sup>。一般对于导航卫星系统而言，所能跟踪的卫星越多，其几何分布结构越好，则定位测量结果越可靠，精度也越高。但在一些情况较为复杂时，可见的卫星数目和几何位置可能不满足实现高精度定位的要求，甚至更为严重的是在地下隧道和建筑物内部或在战时，卫星信号可能完全“丢失”，而使得卫星导航系统无法进行正常定位。而伪卫星定位系统就是解决这些问题的一个有效途径。伪卫星定位系统完成定位的示意图如图 1。

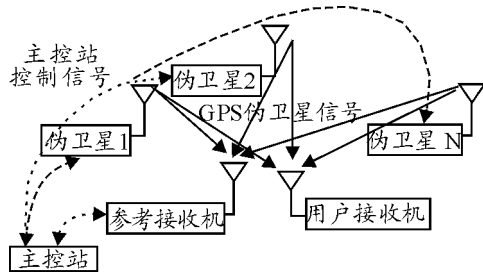


图 1 伪卫星定位系统组成示意图

### 2 伪卫星定位组网布局

伪卫星定位系统组网布局与定位的精度密切相关，其合理布局受以下方面因素的影响和限制：一是定位原理，这是组网布局的基础；二是伪卫星、导航卫星及用户接收机间是否可以达到共视；三是几何衰减因子，布站要使伪卫星之间及与导航卫星之间几何结构相对稳定，而且几何精度衰减因子 GDOP 要尽量小，满足给定的允许值。当然还有许多其他影响因素，但在具体布局在满足共视和抗干扰条件下，根据使几何精度因子最小的原则来优化配置。

#### 2.1 伪卫星定位系统的定位原理

伪卫星定位系统类似于 GPS 的四星定位系统。接收机同时测定至 4 颗伪卫星的距离，方法是测量卫星发射电波至接收机接收到电波的时间差  $\tau$ ，乘以光速  $c$  求得距离  $\rho$ ，即：

$$\rho = c \cdot \tau = c(t_r - t_{pl}) \tag{1}$$

式中， $t_r$  为接收机接收的时刻， $t_{pl}$  为伪卫星发射电波的时刻。由于伪卫星钟和接收机时钟与标准时不完全同步，都存在钟差，设其分别为  $\Delta t_{pl}$  与  $\Delta t_r$ ，实际测得的时间差包含有钟差的影响：

$$\tau' = (t_r + \Delta t_r) - (t_{pl} + \Delta t_{pl}) \tag{2}$$

伪卫星钟差由地面监控系统测定，并通过导航电文提供给用户，可认为是已知的，故实际测得的距离为：

$$\rho' = c \cdot \tau' = c(t_r - t_{pl}) + c\Delta t_r = \rho + c\Delta t_r \tag{3}$$

因为距离观测值  $\rho'$  中包含了接收机钟差引起的误差，而不是接收机至伪卫星的真正距离  $\rho$ ，故称为伪距观测值。

一般用户很难以足够的精度测定接收机的钟差，可以把它作为一个待定参数与接收机的位置坐标一并解出。

将式 (3) 写成：

$$\rho' = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2} + c\Delta t_r \tag{4}$$

式中， $X_j$ 、 $Y_j$ 、 $Z_j$  表示第  $j$  颗伪卫星在地球协议坐标系中的直角坐标，他们可以利用卫星发播的导航电文中给出的卫星位置信息经计算得到，故可以认为是已知量。而  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为接收机在同一坐标系中的位置坐标，与接收机钟差同为待求量。共 4 个未知参数，只须对 4 颗卫星同步观测，获得 4 个伪距观测值  $\rho'_j (j=1, 2, 3, 4)$ 。组成 4 个方程式，通过解算即可解出接收机位置  $(X, Y, Z)$  和钟差  $\Delta t_r$ 。

以上是四星定位的基本原理<sup>[3]</sup>。可见，用户通过接收机对不少于 4 颗卫星进行伪距测量，然后利用导航电文提供的伪卫星位置和伪距观测值，即可结算出接收机的位置。

#### 2.2 伪卫星的“视距”范围

在基于区域卫星导航定位系统的伪卫星局部定位系统中，需考虑“视距”范围即伪卫星的可见性问题，这是导航定位的前提条件，也影响到整个系统的作用范围<sup>[4]</sup>。

为粗略研究伪卫星的视距范围，可将地球简化为一个圆球，其半径  $R$  取 WGS-84 系统的半长轴  $a$ ，即： $R=6\ 378.137\text{ km}$ 。假定在地面配备伪卫星，用户接收机处于空中 500 m 处，则根据用户接收机对导航卫星和所有伪卫星站可视的前提条件，能够得出伪卫星基地的视距范围如图 2。

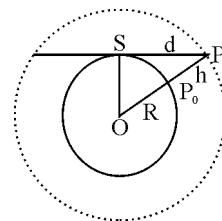


图 2 地面伪卫星覆盖范围

在图 2 中, O 点为地心, P 点为用户, S 为地面伪卫星基站, h 为用户高度, 对空中用户伪卫星基站所能覆盖的地面半径  $SP_0$  为:

$$SP_0 = R \times \arccos \frac{R}{R+h} \quad (5)$$

当  $h=500\text{ m}$  时,  $SP_0=80\text{ km}$ 。由此可知, 当用户处于  $500\text{ m}$  高空时, 地面 2 个伪卫星基站之间的距离最大不能超过  $2SP_0=160\text{ km}$ , 但这只是用户恰位于两基站的中心时同时对两基站通视的临界值, 如果用户偏离两基站中心时, 则用户只能接收一个基站信号。故若要保证用户对所有伪卫星基站通视, 则仿真区域不能大于  $SP_0$ 。值得注意的是地面伪卫星对地面用户是不可见的, 因此它不能提高地面用户的定位精度。如图 3 为  $SP_0$  随高度 h 的变化情况。

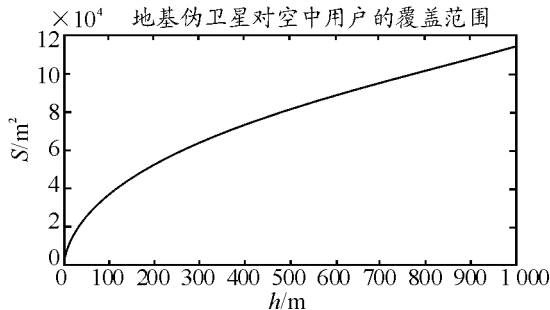


图 3 地基伪卫星对用户的“视距”范围

地基伪卫星布设方便、快捷、单站运行成本低, 但覆盖范围有限、几何构型受地表限制往往不能达到最佳, 只能应付小区域、精度要求较低、单次或短期使用的一时之需。应用到局部区域中就是考虑: 在可视范围内如何对伪卫星布站才能满足需求。

### 2.3 几何衰减因子

考虑在空间直角坐标系中, 接收机  $i$  接收到的  $k$  颗伪卫星, 对于伪卫星伪距观测方程 (4), 其误差方程组写为如下的矩阵形式:

$$V = [H \quad r] \cdot \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \end{bmatrix} - \Delta \rho = G \cdot \delta u - L \quad (6)$$

式 (6) 中:

$$H = \begin{bmatrix} g_1^1(t)^T \\ g_1^2(t)^T \\ \vdots \\ g_1^k(t)^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1^1(t) & m_1^1(t) & n_1^1(t) \\ l_1^2(t) & m_1^2(t) & n_1^2(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ l_1^k(t) & m_1^k(t) & n_1^k(t) \end{bmatrix};$$

$g_i^s(t) = [l_i^s(t) \quad m_i^s(t) \quad n_i^s(t)]^T$  是在  $t$  时刻从接收机  $R_i$  至伪卫星  $S^j$  之间的方向余弦矢量;

$$r = [1 \quad \dots \quad 1]^T; \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \end{bmatrix}; \quad \delta u = \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \\ \delta t \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_j^1 - \rho_j^1 \\ \hat{\rho}_j^2 - \rho_j^2 \\ \vdots \\ \hat{\rho}_j^k - \rho_j^k \end{bmatrix}。$$

2 个量之间的相关性可以分为物理相关和数学相关。例如, 由 2 个观测站同步观测一颗卫星得到的  $R_1^s(t)$  和  $R_2^s(t)$ , 由于观测的是同一颗卫星, 所以它们在物理上是相关的; 但相反的是, 通常认为它们在数学上是不相关的, 即上述观测量是相互独立的。同时假设, 独立观测量的误差服从正态分布, 其数学期望为零, 方差为  $\sigma_0^2$ 。一般都是设观测值权阵为  $P=I$ , 其协因数阵  $Q=P^{-1}$ 。

于是, 由最小二乘法则, 有:

$$\delta \hat{u} = (G^T G)^{-1} \cdot G^T L \quad (7)$$

其协因数阵为:

$$COV(\delta \hat{u}) = (G^T G)^{-1} \quad (8)$$

其矩阵形式一般为:

$$Q_u = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ q_{41} & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{bmatrix} \quad (9)$$

则所有未知参数解的精度为:

$$m_u = \sigma_0 \sqrt{q_{ii}} \quad (10)$$

可以看出,  $Q_u$  中的元素  $\sqrt{q_{ij}}$  包含了所有未知数的精度信息, 也是评价定位结果的重要依据。由这个思路推广开来, 卫星定位时常采用精度因子 (Dilution of Precision, 简称 DOP) 的概念来反映 GPS 定位中点位精度随卫星星座位置不同的变化情况。主要有水平方向精度因子 (HDOP), 垂直方向精度因子 (VDOP) 以及几何精度因子 (GDOP)。

#### 1) 平面位置精度因子 HDOP:

$$HDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22}} \quad (11)$$

#### 2) 高度精度因子 VDOP:

$$VDOP = \sqrt{q_{33}} \quad (12)$$

#### 3) 几何精度因子 PDOP (Position Dilution of Precision):

$$PDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33}} \quad (13)$$

#### 4) 几何精度因子 GDOP (Geometric Dilution of Precision) 是描述空间位置误差和时间误差综合影响的精度因子。

$$GDOP = \sqrt{q_{11} + q_{22} + q_{33} + q_{44}} = \sqrt{tr Q_u} = \sqrt{tr(G^T G)^{-1}} \quad (14)$$

在定位解算过程中, 通过计算这些精度因子的大小与定位卫星所围成的几何图形的大小成反比<sup>[5]</sup>。若用 4 颗伪卫星进行定位, 为了得到最小的精度因子, 应该在配置它们的位置时, 使得它们所构成的几何图形达到最大, 即几何精度因子 GDOP 与被观

测伪卫星所构成的四面体体积  $V$  成反比:

$$GDOP \propto \frac{1}{V} \tag{15}$$

伪卫星几何分布示意图如图 4。

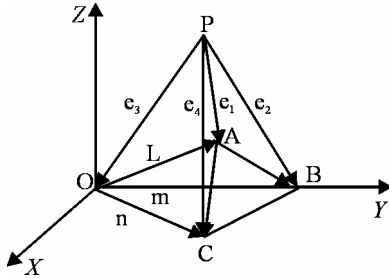


图 4 伪卫星几何分布示意图

### 3 结束语

该研究对影响伪卫星定位组网布局的几个因素进行了分析及仿真,对获得最佳的伪卫星定位系统组网布局具有广泛的应用价值。虽然伪卫星定位技术在理论和应用研究中尚有很多难题有待解决,但

\*\*\*\*\*

(上接第 52 页)

#### 4) 军事信息服务流程组合

该阶段的主要工作是以所选取的军事信息服务为基础,在系统业务流程的指导下,进行军事信息服务的组合,把较小的服务集成为较大的服务,即构成满足系统业务流程要求的业务服务,并定义各服务节点之间的依赖关系,形成军事信息服务组合模型。同时,还要对所构建的组合模型进行流程分析,防止其中的错误和冗余结构,并进行方案优化,以保证模型在实施前的正确性与简洁性,从而为系统的实现奠定基础。

#### 5) 系统实现阶段

该阶段主要依据所构建的军事信息服务组合模型,将所需的组合服务进行封装、部署、发布,并明确方案中各军事信息服务与资源实体的对应关系,并对系统的其它辅助功能进行合理配置,从而构建出所需的指挥控制系统。

在系统的构建过程中还需注意:在进行系统需求分析以及军事信息服务的选择时,都要以语义技术为支持。因为要使计算机能根据“需求”查找和发现“服务”,就需要“需求”和“服务”都由某种统一的方式描述,这样才能解析“需求”,匹配“服务”,这种统一的描述方式是由语义技术实现的<sup>[7]</sup>。语义技术就是来建立人的理解与计算机理解的桥梁,使网络中各种服务按人的知识和需求来组织构建。在指控系统构建过程中,可能涉及到军事

其应用前景相当广阔,已成为导航领域的一个新的研究热点,得到了国际学术界的广泛重视<sup>[6]</sup>。下一步,将对影响伪卫星定位系统定位精度的其他因素,比如远近效应、多路径效应、时间同步等进行研究。

### 参考文献:

[1] Strada, J. A., Henderson, D. W., Navstar Field Test Results, Global Positioning System[J]. Washington: Institute of Navigation, DC, 1980.

[2] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[3] 董绪荣, 张守信, 华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 北京: 国防科技出版社, 1998.

[4] 孟键. 伪卫星定位技术与组网配置研究[D]. 河南: 解放军信息工程大学, 2007.

[5] 王惠南. GPS 导航原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[6] 杨光, 何秀凤, 华锡生. 伪卫星增强 GPS 观测应用于形变监测的研究[J]. 导航, 2004, 40(1): 95-102.

领域中所有知识和需求。而军事领域中所有通用的术语、概念、条令和命令等通过本体技术都可以转化为机器可读、可处理的内容。若军事信息服务也采用同样的语义技术进行描述,便很容易实现系统功能与军事信息服务之间的匹配映射关系,这也是军事信息服务能按需满足指控系统构建原因之一。

### 4 结论

作为未来指控系统的解决方案,该系统必将对未来指控系统的建设发展产生深远的影响。下一步,将对怎样提高系统的实时性、安全性、可靠性等做更深入的研究。

### 参考文献:

[1] IBM.SOA and Web Service 新手入门. [http:// www-128.ibm.com/developerworks/cn/webservices/newto/](http://www-128.ibm.com/developerworks/cn/webservices/newto/).

[2] W3C. Web Service Architecture, W3C Working Group Note, 11 February 2004, <http://www.w3c.org/TR/ws-arch>.

[3] Thomas Erl. Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design[M]. Honolulu, USA: Prentice Hall PTR, 2005, 25-26.

[4] 毛新生. SOA 原理·方法·实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

[5] 卢致杰, 覃正, 韩景, 等. SOA 体系设计方法研究[J]. 工业工程, 2004, 7(6): 55-58.

[6] 何强, 郝建国, 黄健. 基于 SOA 的仿真服务系统[J]. 计算机仿真, 2007, 24(5): 98-102.

[7] 王星星, 张红旗. 基于 Web 服务的军事网格平台体系结构研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(22): 5405-5408.