



一种利用载波相位差值的伪卫星定位方法

徐亚明^{1,2} 孙福余¹ 张 鹏^{1,2} 王金岭³

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079

3 新南威尔士大学土木和环境工程学院,澳大利亚,悉尼

摘要:针对卫星定位技术无法应用于室内环境的情况,提出了一种新颖的利用载波相位差值的伪卫星定位方法,该方法能够实现亚米级的定位精度,而且无需基准站的支持,无需伪卫星之间的时钟同步,也不需要求解整周模糊度。构建了伪卫星定位的系统模型,并阐述了利用载波相位差值进行定位的基本原理。首先将双天线接收机输出的两组载波相位测量值进行单次差分操作,消除共有误差带来的影响,然后通过非线性最小二乘方法迭代解算出双天线连线中点的空间位置。仿真结果和基于双通道软件接收机的实测数据均证明了该方法的可行性,能够作为现有室内定位技术的有效补充。

关键词:室内定位;伪卫星;载波相位;双天线;软件接收机

中图分类号:P228

文献标志码:A

卫星定位技术能够提供可靠和高精度的位置信息,但在室内环境中,卫星定位技术的使用受到了很大的限制,以至于无法持续输出精确和可靠的位置解。虽然 WiFi、WSN、RFID 和蓝牙等技术^[1]都能够被用于室内定位,但是这些定位技术均无法持续地提供亚米级的定位精度。UWB 技术尽管定位精度更高,但其占用频谱广、传送距离短的特点限制了 UWB 技术在定位领域的广泛应用。

伪卫星定位系统为室内定位领域提供了一种合适的解决方案,其定位原理与传统的卫星系统基本相同,接收机的软硬件结构也与卫星接收机保持一致^[2]。最有代表性的伪卫星系统是 Locata 系统^[3],该系统充分利用了接收机输出的载波相位测量值,能够持续输出厘米级精度的位置解,但是 Locata 系统需要伪卫星保持严格的时间同步。文献[4-5]中的伪卫星定位系统可以利用传统的卫星接收机实现米级定位精度。但是伪距测量值容易受多路径效应的影响,在反射物较多的室内环境中,定位精度会明显降低。IMES 系统^[6]在伪卫星导航电文中包含了伪卫星的坐标和楼层信息,其定位精度与伪卫星的布设密度有着

密切关系,定位精度一般只能达到 10 m 左右。文献[7-8]选择利用接收机输出的伪卫星信号载噪比,结合无线信号的衰落模型,计算出接收机的空间位置,只能够达到 10 m 级的定位精度。

本研究介绍了一种基于双天线接收机的伪卫星定位技术,双天线之间的距离固定且小于伪卫星信号载波波长的一半。首先将双天线接收机输出的两组载波相位测量值进行单次差分操作;然后通过非线性最小二乘方法解算出双天线连线中点的空间坐标,并对定位结果进行了仿真分析,讨论了影响定位结果的主要因素;最后在由 5 颗商用伪卫星构成的真实伪卫星试验场景中,利用双通道软件接收机输出的实测数据,验证了这种利用载波相位差值的伪卫星定位方法能够达到亚米级的定位精度。

与以 Locata 为代表的伪卫星定位系统相比,这种利用双天线接收机输出的载波相位差值的伪卫星定位方法无需基准站的支持,也不需要进行伪卫星间的时钟同步,既能够充分利用载波相位测量值高精度特点,又无需进行整周模糊度解算,因此可作为现有伪卫星定位技术的有效补充。

文献[9-10]与本研究有相似之处。文献[9]

提出了一种利用载波相位测量值的双曲线定位方法,采用3个近距离布设的伪卫星发射天线,并且每个天线发射不同的伪随机码。随着接收机和伪卫星距离的增加,定位结果会显著恶化;文献[10]进一步利用6个近距离布设的伪卫星发射信号的载波相位测量值来计算接收机的位置,实现更为复杂。而本研究适用于更加通用的分布式伪卫星场景,并且采用的双天线接收机已经在定向和抗干扰等领域得到了应用。

1 伪卫星定位系统模型

因为研究的重点主要在室内区域,所以本研究选择了独立的本地坐标系。在进行室内定位时,通常将接收天线固定在待定位设备的顶部,而且室内环境的地面相对比较平整,因此认为两个距离接近的接收天线始终位于同一个水平面。

图1给出了伪卫星*i*、接收机天线*a*和*b*的空间几何关系。天线*a*和*b*处于同一个水平面,且天线之间的距离为*d*(*d*需要小于伪卫星信号载波波长的一半)。由于*d*的值固定不变,并且可以进行精确标定,因此*d*被视为已知量。

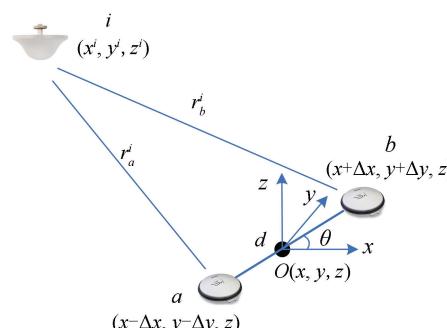


图1 伪卫星和双天线的几何关系

Fig.1 Geometric Relations Between Pseudolite and Dual-Antenna

两个天线几何中心*O*的三维坐标表示为(*x*,*y*,*z*),*x*、*y*、*z*均为未知参数。天线连线与*x*坐标轴之间的角度表示为*θ*(以下简称天线方向角)。由于*θ*的值会随着待定位设备的转向而发生变化,因此也将*θ*作为未知参数进行求解。

根据图1的几何关系,可以推算出天线*a*和*b*的三维坐标分别为(*x*-Δ*x*,*y*-Δ*y*,*z*)和(*x*+Δ*x*,*y*+Δ*y*,*z*),Δ*x*和Δ*y*分别表示为:

$$\Delta x = 0.5d \cos \theta \quad (1)$$

$$\Delta y = 0.5d \sin \theta \quad (2)$$

伪卫星*i*的天线坐标已知,记为(*x*^{*i*},*y*^{*i*},*z*^{*i*}),那么伪卫星*i*和天线*a*之间的距离可以表示为:

$$r_a^i = \sqrt{(x - \Delta x - x^i)^2 + (y - \Delta y - y^i)^2 + (z - z^i)^2} \quad (3)$$

类似地,伪卫星*i*和天线*b*之间的距离也可以记为:

$$r_b^i = \sqrt{(x + \Delta x - x^i)^2 + (y + \Delta y - y^i)^2 + (z - z^i)^2} \quad (4)$$

*r*_{*a*}^{*i*}和*r*_{*b*}^{*i*}的差值可以通过式(5)计算得到:

$$r_{ab}^i = r_a^i - r_b^i = \sqrt{(x - \Delta x - x^i)^2 + (y - \Delta y - y^i)^2 + (z - z^i)^2} - \sqrt{(x + \Delta x - x^i)^2 + (y + \Delta y - y^i)^2 + (z - z^i)^2} \quad (5)$$

由式(1)和式(2)可知,Δ*x*和Δ*y*中的未知参数只有*θ*,因此在式(5)中,有*x*、*y*、*z*和*θ*共4个未知参数,而*r*_{*ab*}^{*i*}的值可以通过下文§2中式(9)计算得到。

2 载波相位差值定位原理

一旦天线*a*和天线*b*所连接的双天线接收机捕获到了伪卫星*i*的信号,就会借助锁相环技术,对伪卫星*i*的信号保持持续跟踪,并输出相应的载波相位测量值φ_{*a*}^{*i*}和φ_{*b*}^{*i*},分别表示为:

$$\varphi_a^i = \lambda^{-1} r_a^i + \frac{c}{\lambda} (\delta t - \delta t^i) + N_a^i + \epsilon_{\varphi,a}^i \quad (6)$$

$$\varphi_b^i = \lambda^{-1} r_b^i + \frac{c}{\lambda} (\delta t - \delta t^i) + N_b^i + \epsilon_{\varphi,b}^i \quad (7)$$

式中,λ表示伪卫星载波信号的波长;δ*t*和δ*t*^{*i*}分别表示双天线软件接收机的钟差和伪卫星*i*的钟差,由于天线*a*和天线*b*共享一个双天线接收机,共用同一个晶体振荡器,因此对应同一个δ*t*;N_{*a*}^{*i*}和N_{*b*}^{*i*}分别表示天线*a*和天线*b*捕获到的伪卫星*i*信号的整周模糊度;ε_{*φ,a*}^{*i*}和ε_{*φ,b*}^{*i*}可以被视为载波相位测量值的测量噪声。通过式(8)可以进一步计算φ_{*a*}^{*i*}和φ_{*b*}^{*i*}的差值,以移除未知的接收机钟差δ*t*和伪卫星*i*的钟差δ*t*^{*i*}。

$$\varphi_{ab}^i \approx \varphi_a^i - \varphi_b^i = \lambda^{-1} (r_a^i - r_b^i) + (N_a^i - N_b^i) + (\epsilon_{\varphi,a}^i - \epsilon_{\varphi,b}^i) \quad (8)$$

式(8)两端的单位均为周,因此将式(8)两端同时取余数运算。因为天线*a*和*b*之间的距离被限制为小于伪卫星信号载波波长λ的一半,根据三角形原理,有(r_{*a*}^{*i*}-r_{*b*}^{*i*})<0.5λ,即λ⁻¹(r_{*a*}^{*i*}-r_{*b*}^{*i*})总是小于0.5周,所以取余数之后的结果仍然为λ⁻¹(r_{*a*}^{*i*}-r_{*b*}^{*i*})。而(N_{*a*}^{*i*}-N_{*b*}^{*i*})始终为整数,取余数

后的结果为 0。又由于载波相位测量值的测量噪声 $\epsilon_{\varphi,a}^i$ 和 $\epsilon_{\varphi,b}^i$ 一般小于 0.01 周, 因此 $(\epsilon_{\varphi,a}^i - \epsilon_{\varphi,b}^i)$ 取余数的结果也仍然为 $(\epsilon_{\varphi,a}^i - \epsilon_{\varphi,b}^i)$ 。则式(8)两端取余数的结果可以表示为式(9), 其中 mod 表示取余数运算符。

$$\begin{aligned}\text{mod}(\varphi_{ab}^i, 1) &= \lambda^{-1}(r_a^i - r_b^i) + \\ (\epsilon_{\varphi,a}^i - \epsilon_{\varphi,b}^i) &= \lambda^{-1}r_{ab}^i + \epsilon_{\varphi,ab}^i\end{aligned}\quad (9)$$

式(9)给出了 φ_{ab}^i 的小数部分 $\text{mod}(\varphi_{ab}^i, 1)$ 和 r_{ab}^i 之间的关系, 而 $\text{mod}(\varphi_{ab}^i, 1)$ 可以根据载波相位测量值 φ_a^i 和 φ_b^i 直接计算得到。

由于式(5)中有 x, y, z 和 θ 共 4 个未知参数, 记为 $\mathbf{u} = [x \ y \ z \ \theta]^T$, 理论上最少需要 4 颗伪卫星的测量值 $\text{mod}(\varphi_{ab}^i, 1), i=1,2,3,4$ 。考虑到冗余量, 在接下来的仿真和实测场景中, 均选择了 5 颗伪卫星的载波相位测量值的数据, 并通过高斯牛顿迭代算法进行定位计算。

由 5 颗伪卫星的测量值 $r_{ab}^i (i=1,2,\dots,5)$ 组成 5 组非线性方程。首先设定 $\mathbf{u} = [x \ y \ z \ \theta]^T$ 的初始值分别为 x_0, y_0, z_0 和 θ_0 , 对式(5)进行线性化:

$$\begin{aligned}r_{ab}^i(x, y, z, \theta) &= r_{ab}^i(x_0, y_0, \theta_0) + \\ \frac{\partial r_{ab}^i}{\partial x} \Big|_{x=x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial r_{ab}^i}{\partial y} \Big|_{y=y_0} \Delta y_0 + \\ \frac{\partial r_{ab}^i}{\partial z} \Big|_{z=z_0} \Delta z_0 + \frac{\partial r_{ab}^i}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} \Delta \theta_0\end{aligned}\quad (10)$$

然后由 5 组线性化后的方程构成如下矩阵方程:

$$\mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{u}_0 = \mathbf{b} \quad (11)$$

式中,

$$\mathbf{G} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial r_{ab}^1}{\partial x} \Big|_{x=x_0} & \frac{\partial r_{ab}^1}{\partial y} \Big|_{y=y_0} & \frac{\partial r_{ab}^1}{\partial z} \Big|_{z=z_0} & \frac{\partial r_{ab}^1}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_{ab}^5}{\partial x} \Big|_{x=x_0} & \frac{\partial r_{ab}^5}{\partial y} \Big|_{y=y_0} & \frac{\partial r_{ab}^5}{\partial z} \Big|_{z=z_0} & \frac{\partial r_{ab}^5}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{u}_0 = \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta z_0 \\ \Delta \theta_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \lambda \text{mod}(\varphi_{ab}^1, 1) - r_{ab}^1(\mathbf{u}_0) \\ \vdots \\ \lambda \text{mod}(\varphi_{ab}^5, 1) - r_{ab}^5(\mathbf{u}_0) \end{bmatrix} \quad (14)$$

直接利用最小二乘方法求解式(11), 得到:

$$\hat{\Delta \mathbf{u}}_0 = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b} \quad (15)$$

然后进行迭代计算:

$$\hat{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{u}_0 + \Delta \hat{\mathbf{u}}_0 \quad (16)$$

经过几次迭代后, 就能够求解出未知参数的估计值 $\hat{\mathbf{u}} = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z} \ \hat{\theta}]^T$, 从而完成对双天线接收机的定位计算。

3 仿真实验及定位精度分析

为了和真实的试验场景对应, 仿真过程中选择了与真实伪卫星试验场景完全一致的伪卫星三维坐标。共包括 5 颗伪卫星, 伪卫星的三维坐标见表 1。

表 1 5 颗伪卫星的三维坐标

Tab.1 Three-dimensional Coordinates of Five Pseudolites

伪卫星号	伪卫星三维坐标/m		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	2.506	-3.186	3.204
2	0.064	2.033	2.952
3	5.124	1.930	3.128
4	-2.358	-0.438	2.991
5	-3.444	-2.871	3.255

在本研究中, 伪卫星采用的载波波长和 GPS 的 L1 频段的波长一致, 均为 0.19 m, 双天线之间的间距也相应地设为 0.095 m。载波相位测量值的精度可以达到载波波长的 1%, 因此理论上, 载波相位测量值能够达到优于 2 mm 的测量精度。在仿真过程中, 给载波相位测量值叠加了最大 2 mm 的随机测量噪声。仿真过程直接采用了 MATLAB 中的 fsolve 函数来进行未知参数的迭代计算, 未知参数 x, y, z 的初始值均设置为 0, 而未知天线方位角 θ 的初始值则设置为在真实值的基础上叠加最大 20°的随机误差。在实际的定位过程中, 该方位角的初始估计值可由电子罗盘获取。

在定位范围内选取了 16 个测试点进行仿真试验。测试点的真实平面位置在图 2 中用黑色圆点表示, 代表双天线连线的几何中心, 16 个测试点真实的 z 坐标均为 0.2 m。5 颗伪卫星的空间坐标用 5 个实心小方块表示。在每个测试点均利用叠加了随机测量噪声的载波相位测量值进行 60 次定位计算, 计算出的平面定位结果用绿色点表示。

另外, 因为天线方位角 θ 也需要作为未知参数进行估计, 所以在仿真验证阶段, 将 θ 的真实值分别设定为 0°、45° 和 90° 等 3 种情况。在 3 种情况下分别计算出的 16 个测试点的平面坐标值分别如图 2 所示。

选择 1、6、11 和 16 号 4 个典型的测试点进行

误差分析,这4个测试点的平面坐标分别为 $(-0.6, -2.4)\text{m}$ 、 $(0.6, -1.2)\text{m}$ 、 $(1.8, 0)\text{m}$ 和 $(3.0, 1.2)\text{m}$ 。针对天线方位角分别为 0° 、 45° 、 90° 时

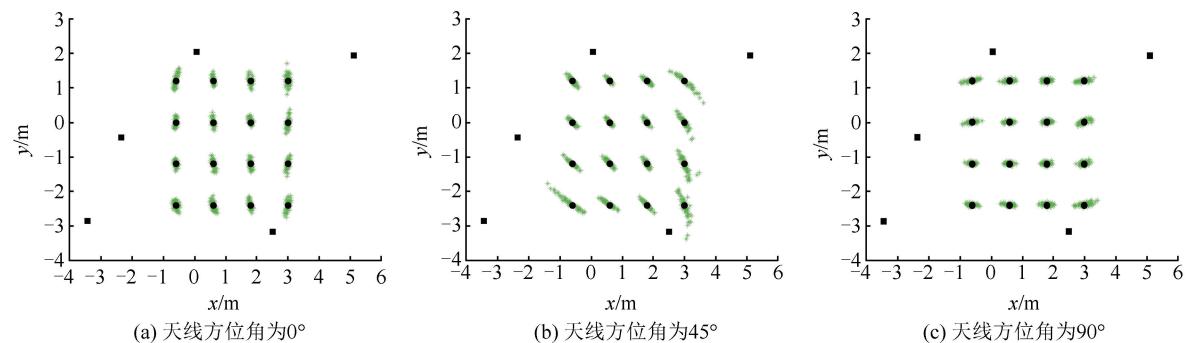


图2 天线方位角取不同值时的定位结果

Fig.2 Positioning Results when Antenna Azimuth Takes Different Values

表2 天线方位角取不同值时的定位结果统计

Tab.2 Statistical Positioning Results when Antenna Azimuth Takes Different Values

测试点号	$\theta=0^\circ$				$\theta=45^\circ$				$\theta=90^\circ$			
	x/m	y/m	z/m	$\theta/^\circ$	x/m	y/m	z/m	$\theta/^\circ$	x/m	y/m	z/m	$\theta/^\circ$
1	0.13	0.33	0.34	1.85	0.75	0.60	0.91	4.89	0.31	0.08	1.58	1.23
6	0.12	0.34	0.39	1.87	0.12	0.34	0.39	1.87	0.30	0.07	1.56	1.08
11	0.11	0.25	0.34	1.44	0.29	0.26	0.79	1.24	0.30	0.07	1.53	1.50
16	0.11	0.59	0.36	2.37	0.11	0.59	0.36	2.37	0.41	0.10	1.62	1.34

根据定位结果和误差分析可以得出:

1)采用载波相位差值的定位方法在平面方向的最大定位误差均小于1 m,而在 z 方向的定位误差相对较差。这主要是因为所有伪卫星均分布在接收机天线的上方,因此会造成在垂直方向上的定位误差变大。对于室内定位的场景,重点关注的是平面定位精度,可以考虑预先标定天线高度 z ,并将 z 值作为已知数代入定位计算,达到减小计算量的目的,并得到更高的平面定位精度。

2)计算出天线方位角的最大误差不超过 5° ,多数情况在 2° 以内,说明将天线方位角作为未知参数进行估计在理论上是可行的。但是由于估计方位角涉及到三角函数的泰勒级数展开,实现较为复杂。而且在进行最小二乘方法求解时,会让迭代计算次数明显增加,解的质量变差。由于主流的电子罗盘等定向设备均能够提供 2° 以内的角度测量精度,因此在实际定位场景中,选择电子罗盘等角度测量设备来估计天线方位角,可以显著降低求解过程的复杂性。

3)靠近定位区域中心的测试点的平面定位效果较好,而靠近定位区域边缘的测试点的定位结果相对较差。这也解释为中心区域具有较好的伪卫星几何结构,对应着较小的DOP值,而边缘区域的伪卫星几何结构变差,DOP值会明显增

大。进一步观察图2可以看出,水平方向的定位误差与天线方位角的取值有着密切关系。天线方位角为 0° ,意味着双天线连线平行于 x 轴,那么此时 x 方向的定位精度很高,而与双天线连线垂直的方向上的定位精度较低;天线方位角为 90° ,意味着双天线连线与 y 轴平行,在 y 方向上能够达到相对更高的定位精度,而在 x 方向上的定位精度会有明显的降低。后续的真实伪卫星场景下的实测结果也有类似现象。这种现象可以解释为:当入射的伪卫星信号垂直于双天线的连线,两个天线捕获到的信号的载波相位测量值的分辨率较低;而当入射的伪卫星信号平行于双天线连线方向时,两个天线捕获到伪卫星信号的载波相位测量值有较大的差别,带来了更高的载波相位测量值的分辨率。

4 实测数据结果分析

在实测试验中,采用的5颗商用伪卫星的型号均为GSG-L1,它可以输出包含简化的导航电文和C/A码的L1频段载波。伪卫星的发射天线选择了线性极化的全向天线,可以支持较大的覆盖范围。USRP是专用的软件无线电的硬件平台,通过搭配合适的子板,可以捕获全系列的导航

卫星信号,在本试验中被选择作为双天线软件接收机的射频前端。两块型号为 DBSRX 的子板被装配在 USRP 中,可以捕获 800 MHz 至 2.4 GHz 的信号,能够完整地捕获到工作在 L1 频段的伪卫星信号。两块 DBSRX 的子板共用同一个晶振,保证了两个天线输入数据的完全同步。两个接收机天线选择了常规的贴片天线。USRP 将处理后的两路数字中频信号通过 USB 接口传递到计算机。计算机上的双通道软件接收机程序能够实时地对两路输入信号进行处理,并输出 RINEX 格式的数据文件,载波相位测量值的输出频率为 10 Hz。

试验在一面积为 $10 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 的房间内进行,5 颗伪卫星的天线被布设在了屋顶,如图 3 所示。试验采用了独立的本地坐标系,5 颗伪卫星天线的坐标预先采用全站仪进行了精确测定,三维坐标见表 1。



图 3 伪卫星天线布置

Fig.3 Distribution of Pseudolite Antennas

双天线被依次放置在 4 个测试点,测试点与双天线几何中心严格对准,双天线间的距离固定为 0.095 m,天线高度为 0.2 m,天线方位角由型号为 DCM260 的电子罗盘测量得到,其方位角的标称测量精度为 0.8°。在每个测试点处,双天线软件接收机均稳定测量 60 个历元的数据,然后按照 § 2 的载波相位差值定位原理计算出双天线几何中心的平面坐标。

定位结果如图 4 所示,伪卫星的位置用黑方块表示,4 个测试点的真实位置用黑色的点来表示。而在 4 个测试点逐个历元的定位结果分别用红、蓝、绿和青等颜色的点来表示。

4 个测试点的 x 方向和 y 方向的定位结果统计见表 3。从表 3 可知,平面方向的平均定位误差基本可以保持在 0.35 m 以内,而最大的定位误差可以控制在 1 m 左右。这与仿真得到的结果基本一致,证明了利用载波相位差值的伪卫星定位方法的可行性。

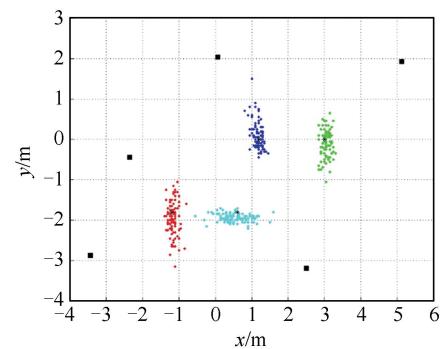


图 4 4 个测试点的定位结果

Fig.4 Positioning Results for Four Test Points

表 3 4 个测试点的定位结果统计

Tab.3 Statistical Positioning Results for Four Test Points

测试点 颜色	平均误差		最大误差	
	x/m	y/m	x/m	y/m
红	0.15	0.29	0.34	1.16
蓝	0.21	0.35	0.47	1.48
绿	0.11	0.20	0.33	1.02
青	0.23	0.22	1.33	0.39

在图 4 中的红色、蓝色、绿色测试点,双天线的连线方向平行于 x 轴,相应地在 x 方向能够达到更高的定位精度;而在青色测试点,双天线的连线方向平行于 y 轴,在 y 方向上的定位精度更好,这也与之前的仿真结果保持一致。

5 结语

本文介绍了一种利用载波相位差值的伪卫星定位方法,能够在无需基准站的协助,无需伪卫星之间的时钟同步,也无需求解整周模糊的情况下实现亚米级的定位精度。包含 5 颗伪卫星的仿真结果和基于商用伪卫星及双通道软件接收机的实测数据均验证了该定位方法的有效性,能够作为现有的室内定位技术的有效补充。由于室内环境中多路径现象严重,在实测的过程中,当双天线被放置在靠近墙壁和玻璃的位置时,双天线软件接收机无法持续捕获到全部伪卫星信号,导致无法完成定位计算,因此在下一阶段,会针对多路径对定位带来的影响和抑制方法进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] Gu Y Y, Anthony L, Niemegeers I. A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009(1): 13-32
- [2] Wang J. Pseudolite Applications in Positioning and Navigation Progress and Problems[J]. *Journal of*

- Global Positioning Systems*, 2002,1 (1): 48-56
- [3] Rizos C, Barnes J, Gambale N. Experimental Results of Locata: A High Accuracy Indoor Positioning System[C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zurich, Switzerland, 2010
- [4] Xu R, Chen W, Xu Y, et al. A New Indoor Positioning System Architecture Using GPS Signals[J]. *Sensors*, 2015, 15:10 074-10 087
- [5] Chongwon K, Hyoungmin S, Taikjin L, et al. A Pseudolite-Based Positioning System for Legacy GNSS Receivers[J]. *Sensors*, 2014, 14:6 104-6 123
- [6] Naohiko K, Shusuke M, Satoshi K, et al. Indoor and Outdoor Seamless Positioning Using Indoor Messaging System and GPS[C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Guimaraes, Portugal, 2011
- [7] Daniele B, Ciro G. Asynchronous Pseudolite Navigation Using C/N₀ Measurements[J]. *Journal of Navigation*, 2015, 69(3):639-658
- [8] Daniele B, Ciro G. Indoor Navigation Using Asynchronous Pseudolites[C]. 6th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Munich, Germany, 2013
- [9] Yoshihiro S, Hiroaki A, Takuji E, et al. Hyperbolic Positioning with Proximate Multi-channel Pseudolite for Indoor Localization[C]. Proceedings of the IGNSS Symposium 2013, Gold Coast, Australia, 2013
- [10] Samama N, Vervisch-Picard A, Taillandier-Loize T. A GNSS-like Indoor Positioning System Implementing an Inverted Radar Approach[C]. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Alcalá de Henares, Spain, 2016

A Pseudolite Positioning Approach Utilizing Carrier Phase Difference

XU Yaming^{1,2} SUN Fuyu¹ ZHANG Peng^{1,2} WANG Jinling³

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Precise Engineering and Industry Surveying, NASG, Wuhan 430079, China

3 School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia

Abstract: GNSS receiver could not be used in indoor environments. This paper proposes a novel pseudolite positioning approach utilizing carrier phase difference measurements, which can achieve sub-meter accuracy without the support of a base station, and without the need of synchronization between pseudolites. In addition, in the proposed approach, the integer ambiguity resolution is unnecessary as well. This research builds up system model for pseudolite positioning and proposes basic principle for this positioning method utilizing carrier phase difference measurements. First, two sets of carrier phase measurements output from a dual-antenna receiver are differentiated in order to cancel out the common errors. Then a non-linear least square adjustment method is used to solve spatial coordinates of center point of the dual-antenna iteratively. Simulation results and experiment outputs from a dual-antenna software receiver verified the feasibility of this approach. This pseudolite positioning approach can be regarded as an effective complement of existing indoor positioning techniques.

Key words: indoor positioning; pseudolite; carrier phase; dual-antenna; software receiver

First author: XU Yaming, PhD, professor, specializes in the theories and methods of precise engineering surveying, industrial measurement. E-mail: ymxu@sgg.whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Peng, PhD, lecturer. E-mail: pzheng@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374011, 41474005; the Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2014CFB717.