

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413182

基于超表面反射的北斗信号质量与定位分析*

吴竹君¹, 潘树国¹, 孙健恺², 王国桐², 陶贤露¹

(1. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096; 2. 东南大学信息科学与工程学院毫米波全国重点实验室 南京 210096)

摘要:近年来全球导航卫星系统的发展已趋于成熟,但面对城市复杂环境如城市峡谷、树林遮蔽等场景常会出现可见星不足、卫星信号衰减严重的问题,从而形成定位盲区。不同于常规的从卫星端和接收端寻找定位优化方法的策略,基于超表面辅助的GNSS定位方法是从传播路径上改变无线电环境,实现对卫星信号的不同反射角度的波束赋形,有效建立虚拟视距链路。首先,搭建了定位模型,并设计了能将15°入射的北斗B1信号以30°反射的超表面;然后,通过暗室实测实验分析了其反射信号质量与接收角度和接收距离的关系,验证了其波束赋形能力;最后,评估了基于超表面反射的北斗信号伪距单点定位精度,在东、北、天顶3个方向上的均方根误差分别为2.138、4.456、8.268 m,验证了超表面辅助的GNSS定位的可行性,为后续实现超表面动态定位提供了参考。

关键词: 卫星定位;超表面;伪距单点定位;波束赋形

中图分类号: TH-3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Analysis of Beidou signal quality and positioning based on metasurface reflection

Wu Zhujun¹, Pan Shuguo¹, Sun Jiankai², Wang Guotong², Tao Xianlu¹

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In recent years, the development of global navigation satellite system has matured. However, in complex environments such as urban canyons, forest shading and other scenes, issues such as insufficient visible stars and serious satellite signal attenuation, leading to positioning blind areas. Different from the conventional strategy of finding positioning optimization methods from the satellite end and the receiver end, the GNSS positioning method based on metasurface assistance changes the radio environment from the propagation path. It realizes beamforming of satellite signals at different reflection angles, effectively establishing a virtual line-of-sight link. Firstly, the positioning model is built and a metasurface that can reflect the 15° incident Beidou B1 signal to 30° is designed. Secondly, the relationship between the quality of its reflected signal, receiving angle, and receiving distance is analyzed through darkroom measurement experiments, verifying the beamforming capability. Finally, the pseudo-range single point positioning accuracy of Beidou signal based on metasurface reflection is evaluated. The root mean square error in the east, north and zenith directions were 2.138, 4.456 and 8.268 m, respectively, which verifies the feasibility of metasurface assisted GNSS localization and provides a reference for the subsequent metassural dynamic positioning.

Keywords: satellite positioning; metasurface; pseudorange single point positioning; beamforming

0 引言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)凭借着多信号、多系统、快收敛、高灵敏^[1]等技术

的快速发展,已成为国家重要的空时信息基础设施,全方位支持了经济建设、国防安全和日常生活等多领域的定位、导航及授时服务的需求^[2-3]。目前全球已建成了全球定位系统(global positioning system, GPS)、北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)、GLONASS、

Galileo 四大卫星导航系统。GNSS 定位通过精确计算信号从卫星到接收机的传播时间差以得到距离差,进而求解得到接收机空间坐标,在室外开阔环境下,依托星基增强和地基增强系统的精密单点定位技术 (precise point positioning, PPP) 和实时差分定位技术 (real-time kinematic, RTK) 已能够达到厘米级精度^[4-5]。然而,由于卫星信号的本质是一种电磁波,因此具有天然的脆弱性,即信号弱、穿透能力差、易受干扰,在室内和建筑物密集的城市峡谷难以保证定位服务的可用性和可靠性^[6-9]。通过反射信号的方式将 GNSS 信号延伸至类似的遮蔽空间,将有利于进一步扩大 GNSS 的应用范围,对解决室内和城市峡谷等场景的定位盲区问题具有重要的意义。

超表面 (metasurface) 作为一项新兴技术近年来引起了电子信息领域研究的广泛关注^[10-12]。它是一种人工构造的二维超薄电磁结构,能够对电磁波进行幅值、相位、极化调控^[13],从而对信号进行波束赋形,打破了无线信道环境不可配置的传统认知,具有成本低、重量轻的优势^[14-15]。2011 年, Yu 等^[16]基于广义斯涅尔定律,通过自由排布一种“V”字型结构,改变其张角角度和朝向,得到了能够灵活调整相位分布的超表面。由于设计的便捷性及物理结构的清晰性,自此,基于相位突变这一概念的超表面研究吸引了众多研究者的兴趣。2014 年, Cui 等^[17-18]开创性地提出数字编码超表面,将设计完成的超表面单元采用编码的方式构成二维平面,使得对超表面的研究与数字信号处理领域有了更紧密的结合。

目前,基于超表面辅助的无线通信及定位策略研究已取得一些成果。Kim 等^[19]在 3GPP (3rd generation partnership project) 信道模型设计的基础上,提出了一种改进的基于超表面的信道生成过程;Keykhosravi 等^[20]通过两块超表面调控 60 GHz 毫米波的不同反射角使得接收端信号强度最大,进而利用离开角 (angle of departure, AOD) 方法实现定位;Zhang 等^[21]利用超表面修改反射信号的相移,使最近基站的信号在同一位置创建不同的接收信号强度 (received signal strength, RSS) 值进行定位,并提出了定位误差最小化问题得到了最优相移;Zhao 等^[22]提出了一种基于超表面选择策略的递归定位方案,在仿真环境中实现了多个超表面辅助的障碍物密集环境中的通信信号定位。然而,目前利用超表面辅助卫星定位的研究尚处在初步探索阶段,只有少量仿真验证。

将超表面运用到 GNSS 定位中有望解决城市峡谷的信号遮蔽问题,为将 GNSS 信号拓展到室内提供了新思路。基于超表面辅助的 GNSS 定位思想可以概括为:利用超表面波束赋形的特性,设计超表面单元和阵列的反射相位,实现不同角度反射 (非镜面反射) GNSS 信号至接收机,最后解算伪距单点观测方程,得到用户位置坐标。由于超表面的轻薄和易部署的特点,这种定位方法

中大多考虑将超表面部署在城市峡谷的建筑物外壁上。Zhao 等^[23]提出了一种基于超表面辅助的 GNSS 单用户定位方法,该方法搭建了有 3 条视距链路及一条超表面反射链路的城市定位场景,建立新的伪距观测方程,通过仿真评估了定位误差,最大误差小于 1.2 m。

基于以上研究,从卫星信号的传播路径段引入了超表面,首次以实测实验验证了超表面对北斗信号的非对称反射规律,其中包括接收距离及接收角度对反射信号质量影响,并评估了基于超表面反射的北斗信号伪距单点定位精度,实现北斗卫星信号非直射区域的定向覆盖。本文的具体结构安排如下:1) 介绍卫星定位原理及超表面的波束赋形原理。2) 构建定位系统模型,设计超表面单元和阵列,使得用于定位的北斗信号满足 15°入射、30°出射的要求。3) 设计不同的实测实验,验证了超表面对 GNSS 信号的波束赋形能力,实现了基于超表面反射的北斗信号伪距单点定位解算,并与普通金属表面的伪距单点定位精度作了对比,最后得出结论。

1 伪距单点定位及超表面波束赋形原理

1.1 伪距单点定位原理

接收机 u 跟踪到的卫星 s 的伪距观测值可表示为:

$$\rho = d + c \times (\delta t_u - \delta t^s) + c \times I + c \times T + \varepsilon \quad (1)$$

其中, d 为卫星和用户的几何距离, I 和 T 分别为电离层延时和对流层延时,可以通过模型解出。 ε 则是其余误差项,如接收机噪声、地球自转效应、相对论效应等造成的误差,通常影响较小。

将式 (1) 的已知量和未知量移项后可以得到伪距观测方程的一般表达式:

$$\rho_c = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2} + \delta t_u \quad (2)$$

其中, (x_s, y_s, z_s) 为卫星坐标, (x, y, z) 为用户坐标。设置迭代初始值,将上式在初始值处线性化后得到:

$$GX = \begin{pmatrix} \rho_c^{(1)} - d^{(1)}(x_0) - \delta t_{u,0} \\ \rho_c^{(2)} - d^{(2)}(x_0) - \delta t_{u,0} \\ \vdots \\ \rho_c^{(n)} - d^{(n)}(x_0) - \delta t_{u,0} \end{pmatrix} = b \quad (3)$$

式中: $X = (x - x_0, y - y_0, z - z_0, \delta t_u - \delta t_{u,0})^T$; G 为 $d^{(n)}$ 分别对 $x, y, z, \delta t_u$ 的一阶导构成的雅各比矩阵。

利用最小二乘法,解得:

$$X = (G^T G)^{-1} G^T b \quad (4)$$

根据 X 更新用户坐标,直到位移向量的长度小于设定的阈值即可停止迭代。

1.2 超表面波束赋形原理

对于 $x - y$ 平面上的一块由 $M \times N$ 个反射单元构成的

超表面,为了实现波束赋形,首先需要设置每个单元在平面内的反射相位变化^[24]。假设入射信号的入射方向为 $D_i(\vartheta_i, \varphi_i)$, 经超表面反射后波束方向为 $D_r(\vartheta_r, \varphi_r)$, 根据广义斯涅尔定律得到相邻两个单元的相移为:

$$\begin{aligned} x - \text{axis}: & \frac{2\pi P}{\lambda} \Theta_x(D_r, D_i) \\ y - \text{axis}: & \frac{2\pi P}{\lambda} \Theta_y(D_r, D_i) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Theta_x(D_r, D_i) &= \sin \vartheta_r \cos \varphi_r + \sin \vartheta_i \cos \varphi_i \\ \Theta_y(D_r, D_i) &= \sin \vartheta_r \sin \varphi_r + \sin \vartheta_i \sin \varphi_i \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ϑ 为仰角; φ 为方位角; λ 是信号波长; P 是单元边长。以超表面几何中心为坐标原点, 于是得到远场方向图函数为:

$$\Gamma(\vartheta, \varphi) = \sum_{m=m_0}^{M/2} \sum_{n=n_0}^{N/2} A e^{-j \left[\frac{2\pi P}{\lambda} ((m-1/2)\Theta_x + (n-1/2)\Theta_y) + \phi(m, n) \right]} \quad (7)$$

式中: $m_0 = -M/2 + 1$; $n_0 = -N/2 + 1$; A 为反射幅度; $\phi(m, n)$ 为 (m, n) 单元的反射相位。令 $|\Gamma(\vartheta, \varphi)|$ 取得最大值得到相应的单元阵列排布并实现对应的相位分布, 完成该反射方向下的波束赋形。

基于上述原理, 对于一个沿 x 方向排布的具有 8 个单元的 2-bit 超表面, 当波长为 0.19 m 的信号垂直入射到边长为 1/4 波长的单元上时, 若期望产生一个 $(30^\circ, 0^\circ)$ 方向上的反射波束, 则从左至右计算每列超表面单元的补偿相位为 176.9° 、 126.4° 、 75.8° 、 25.3° 、 334.7° 、 284.2° 、 233.6° 、 183.1° , 将其量化得到该超表面从左至右每列单元的旋转角度分别为 90° 、 90° 、 45° 、 45° 、 0° 、 0° 、 135° 、 135° , 即在该种排布方式下, 超表面可以实现将垂直入射的信号反射至仰角为 30° 、方位角为 0° 的方向上。

2 超表面反射北斗信号方案设计

本节构建了基于超表面辅助的北斗伪距单点定位的系统模型, 并根据需求设计了超表面单元及阵列, 使得中心频率为 1.56 GHz 的北斗 B1 信号以 15° 入射至超表面后以 30° 反射角出射, 发射端与接收端均为右旋圆极化 (right circular polarization, RCP) 波, 并在 B1 信号的临近频段也有较为理想的波束赋形效果。

2.1 系统模型设计

若将超表面应用在城市峡谷等复杂环境中辅助 GNSS 进行定位, 则主要是利用超表面波束赋形的特性来开拓视距链路, 因此, 首先需要验证超表面对 GNSS 信号的波束赋形效果。

为此, 本文设计了实测试验以验证超表面能够对 GNSS 信号 (以北斗 B1 信号为例) 形成非对称的反射, 并对其在不同接收距离和接收角度下的反射规律进行揭示和阐述, 分析利用该反射信号完成伪距单点定位的可行性。本文设计的实验系统模型如图 1 所示。

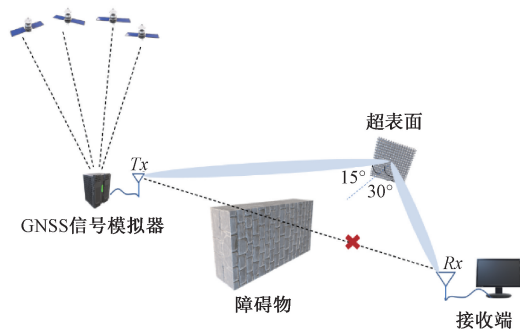


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

为了避免多路径等其他干扰因素, 本实验在微波暗室中展开, 因此, 信号源选用 GNSS 卫星信号模拟器发射, 发射端与接收机之间不存在视距链路。考虑到城市峡谷环境中, 卫星与建筑物的水平夹角较小, 因此, 本实验中将入射角度设计为 15° , 为便于实验结果的呈现, 反射角设计为 30° 。

2.2 超表面设计

超表面的设计过程可分为两个步骤: 首先设计具有所需相位相应的单元, 在 1.56 GHz 的中心频率上满足良好的 RCP 入射和 RCP 反射, 实现右旋圆极化保持, 再对这些单元进行组合形成阵列以实现对应的相位分布。

本系统所设计的超表面单元为中心对称且轴对称的结构, 上下部分为圆弧, 结构图如图 2 所示, θ 为单元旋转角度, 中间区域为金属铜, 灰色区域介质材料为 FR4 (相对介电常数 4.3, 损耗角正切 0.019), 底层用全金属铜作为地。超表面的单元仿真优化目标是在设计频带内获得较大反射率^[25], 经反复试验, 最终确定圆弧半径 r 为 25.12 mm, 金属宽度 w 为 44.70 mm, 厚度为 3 mm, 单元边长 P 设置为 53.19 mm。

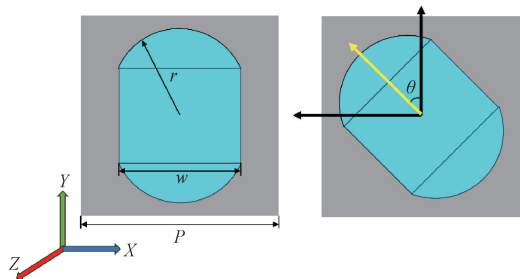


图 2 超表面单元结构

Fig. 2 Unit structure of metasurface

本系统中的超表面通过改变 θ 值实现不同的相位偏移,为满足系统模型需求,同时考虑到加工准确度,本实验所设计的超表面为 3-bit,即有 8 种反射相位,对应 $[0^\circ, 180^\circ]$ 区间内等分的 8 个单元旋转角度。对不同旋转角度单元的反射幅度和反射相位进行仿真,分别得到曲线如图 3(a) 和(b) 所示。从仿真曲线可以看到,在北斗 B1 信号的中心频率 1.56 GHz 附近,8 种旋转角度单元的反射幅度均在 -3 dB 左右,且相邻旋转角单元反射相位差均大致为 45° ,右旋极化保持效果良好,满足设计要求。

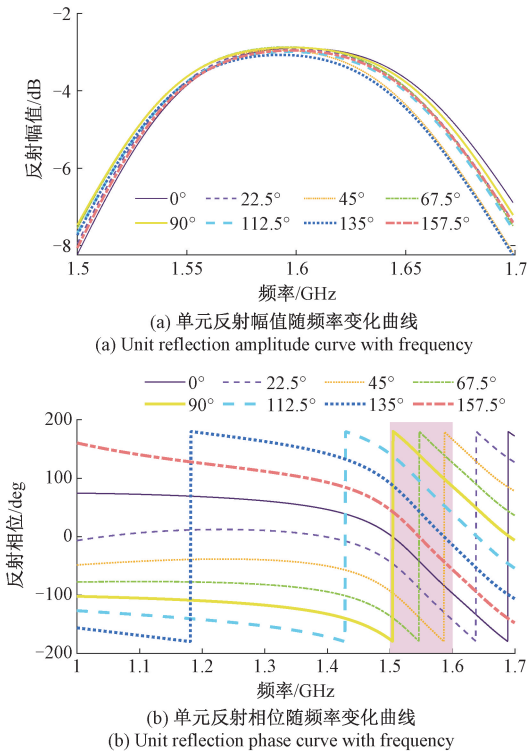


图 3 超表面单元特性

Fig. 3 Unit peculiarity of metasurface

本系统超表面尺寸为 12×20 个单元;反射仰角和反射方位角分别取 30° 和 0° ; $\phi(m,n)$ 为 $[0^\circ, 360^\circ]$ 内从 0° 开始等分的 8 个相位。为了使 $|\Gamma(\vartheta, \varphi)|$ 取得最大值,需要对 8 种具有不同旋转角度的单元进行合理排布。对补偿相位进行量化,得到输出值如表 1 所示,即为最终超表面阵列排布,实物图如图 4 所示。

表 1 超表面阵列排布

Table 1 Metasurface array arrangement

列	旋转角度	列	旋转角度	列	旋转角度	列	旋转角度
1	135.0°	6	67.5°	11	0°	16	135.0°
2	112.5°	7	45.0°	12	0°	17	112.5°
3	112.5°	8	45.0°	13	157.5°	18	90.0°
4	90.0°	9	22.5°	14	157.5°	19	90.0°
5	67.5°	10	22.5°	15	135.0°	20	67.5°

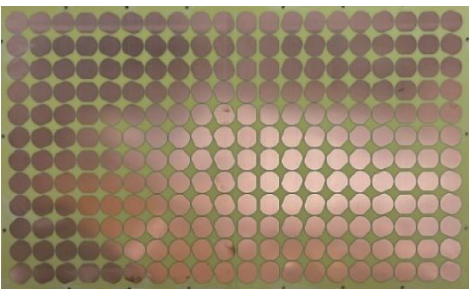


图 4 超表面实物

Fig. 4 Metasurface for experiment

在 CST 软件中对上述阵列设计的超表面的反射波束进行全波仿真,设置入射波束为 1.56 GHz、 15° 斜入射的 RCP 波,得到结果如图 5 所示。由于本系统中超表面仅反射信号而不对信号进行透射,图中平面下方部分可以忽略。可以看到反射信号仅产生了一个 ϑ 为 30° 的主波束,与理论推导完全一致。

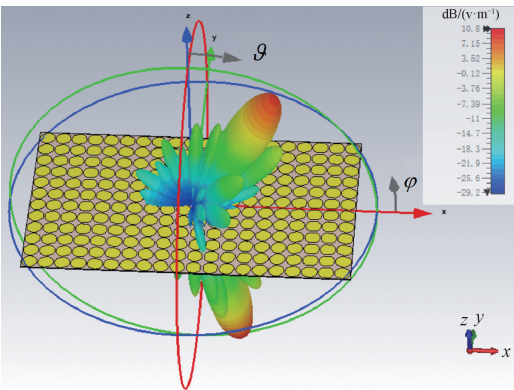


图 5 超表面在 1.56 GHz 频率下的仿真波束

Fig. 5 Simulation beam of metasurface at 1.56 GHz

3 实测验证与分析

本文的实测数据均在微波暗室中采集。实验主要设备包括理工雷科 RGS9000 卫星信号模拟器一台及配套上位机一台、单向发射天线和全向接收天线各一根、u-blox F9 高精度 GNSS 模块一部、超表面一块。实验场地实物图如图 6 所示。在实验中,应当控制入射信号在超表面的入射点位于超表面的几何中心以模拟平面波。在发射天线与接收天线之间有障碍物遮挡,形成非视距 (non line of sight, NLOS) 场景,通过引入超表面作为中继来增加一条虚拟的视距链路。

3.1 波束赋形效果验证

基于上节中提到的系统模型,实验中将发射天线的朝向固定在与超表面的垂直面夹角呈 15° 的方向上,高度

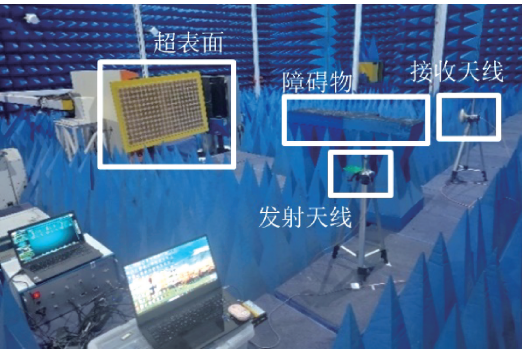


图 6 实验场景

Fig. 6 Experiment scenario

与超表面的几何中心一致,且连线距离为 2.9 m。GNSS 信号模拟器设置北斗 B1 信号以-90 dBm 的发射功率附加 5 dB 增益发出,卫星通道数设置为 12,截止高度角为 15°,用户坐标真值为(-2 144 860. 107 7,4 397 611. 279 3,4 078 045. 535 7)。

首先将接收天线与超表面的距离保持 2.9 m 不变,分别在 0°、15°、30°、45°、60°处接收信号,分析每个历元的所有卫星的载噪比(carrier-to-noise ratio, CNR)均值。由图 7 可知,接收信号的载噪比在 30°处达到峰值,在 15°和 45°处次之,在 0°和 60°处最弱且波动较大。由于在不同角度下接收到的卫星大体一致,且实验期间高度角无明显变化,可以排除高度角对载噪比的影响,初步验证了超表面对北斗信号的波束赋形能力,信号主瓣较为稳定,且主瓣与旁瓣的信号强度差别显著。

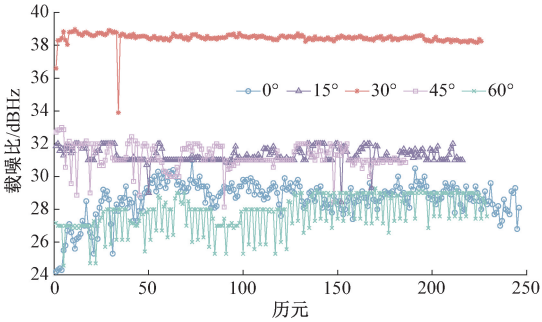


图 7 不同接收角度下的载噪比时序

Fig. 7 Time series of CNR at different receiving angles

保持实验条件不变,先后进行 3 组重复实验,得到不同接收角度的接收卫星平均颗数及载噪比变化趋势如图 8 和 9 所示。由图 9 可以看出每组实验中均在 30° 接收角度下获得了最大载噪比,均值为 39.07 dBHz,且载噪比均值大致以 30°为中心呈轴对称分布,在 0°处的载噪比方差较大,信号质量差,与图 8 结果呈现了一致性,可能是较弱的旁瓣信号混叠了噪声信号所致。

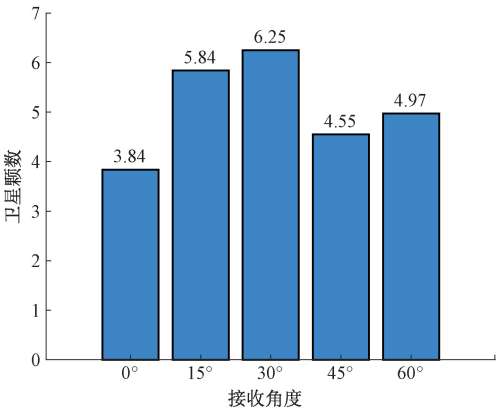


图 8 不同接收角度下接收卫星平均颗数

Fig. 8 Average number of satellites at different receiving angles

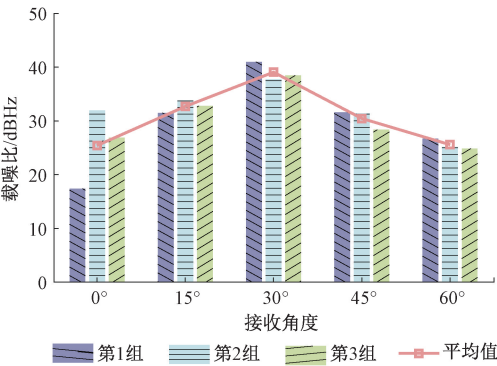
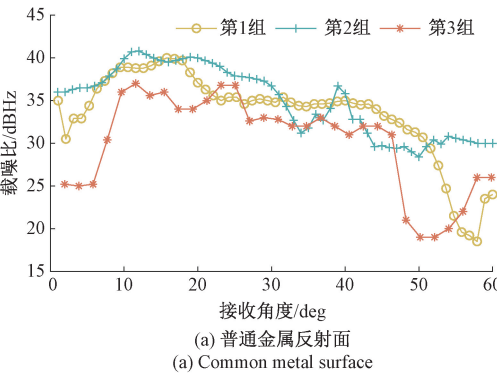


图 9 接收角度与载噪比变化趋势

Fig. 9 CNR versus receiving angle in different group

为获得较为连续的不同接收角度下的载噪比变化,将接收天线从 0°~60°缓慢移动,连续接收超表面的反射信号,并以普通金属表面为对照组采集反射信号。考虑到接收天线的移动可能造成信号的载噪比无法及时稳定在某个数值附近,因此在处理数据时采用了滑动窗口平均法进行滤波,选取窗口宽度为 5,对窗口内的数据取算术平均值作为该点输出值,结果如图 10 所示。



(a) 普通金属反射面
(a) Common metal surface

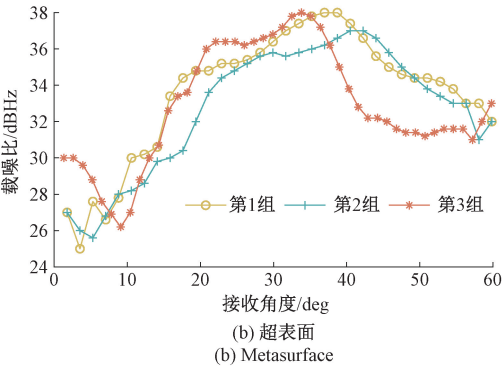


图 10 不同表面的接收角度与载噪比变化
Fig. 10 CNR versus receiving angle for different surfaces

由图 10 结果可以看到,普通金属反射面的载噪比峰值出现在 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 之间,而超表面的载噪比峰值出现在 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间且不同角度范围内的载噪比差异比普通金属反射面更加明显,接收天线动态的连续移动造成了峰值角度的略微偏移,但符合金属表面的镜面反射规律以及仿真实验中超表面的波束赋形效果。

无线信号在传播过程中存在路径损耗,因此不同接收距离下的信号载噪比有着差异。为了探究超表面反射的北斗信号强度与距离的关系,并考虑到 $[0^{\circ}, 15^{\circ})$ 和 $(45^{\circ}, 60^{\circ}]$ 范围内信号质量较低,实验中在 15° 、 30° 、 45° 处分别采集 1.5、2、2.5、3 m 下的北斗反射信号载噪比,得到结果如图 11 所示。从图中可以看出随着接收距离的增加,载噪比下降幅度逐渐变小,载噪比与接收距离更近似于呈现二次函数关系。总体来看, 15° 和 45° 处载噪比随距离的下降速度要大于 30° 处的速度,因为越接近远场时旁瓣信号的衰减越明显。

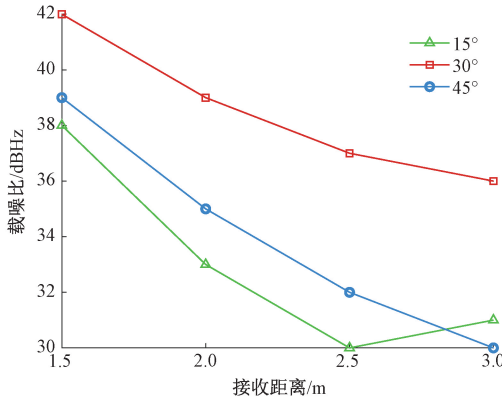


图 11 载噪比随接收距离变化
Fig. 11 CNR versus receiving distance

基于以上实验结果,在 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 接收角度范围内,在多个不同接收距离处采样,得到平面内载噪比分布如图 12 所示。实测数据表明,在 1.5~3 m 区域内, 15° 和

45° 方向上载噪比衰减幅度达到 9 dBHz 左右,而 30° 方向上载噪比衰减不到 5 dBHz,当接收距离来到 3 m 附近时,载噪比随距离的衰减已没有近距离下的衰减显著,甚至在较且小的距离增加范围内出现了载噪比略微升高的情况,这可能与少量多路径干扰的存在有关。

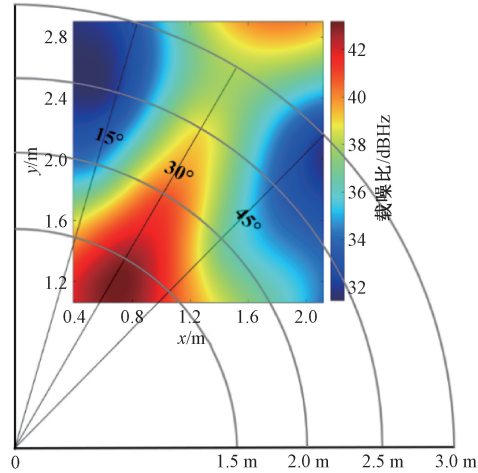
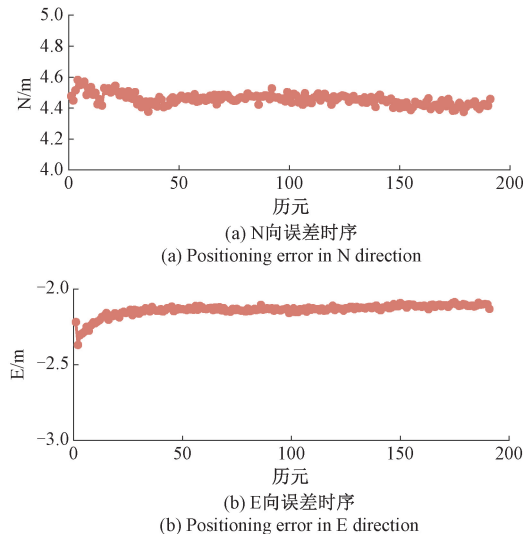


图 12 平面内载噪比分布
Fig. 12 In-plane CNR distribution

3.2 超表面反射信号定位结果

在接收角度为 30° 、接收距离为 2.9 m 处采集经超表面反射的北斗信号,利用伪距单点定位方法对用户位置进行解算,得到 2017 年年积日 126 天 07:41:32~07:44:42 (UTC 时间) 内的北 (N)、东 (E)、天 (U) 3 个方向上的定位误差序列图如图 13 所示。N、E、U 3 个方向的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 4.456、2.138、8.268 m,均在合理的误差范围内,说明经超表面反射的北斗信号没有丢失导航电文信息,能够进行定位解算,这为后续超表面辅助 GNSS 在城市复杂环境中定位奠定了基础。



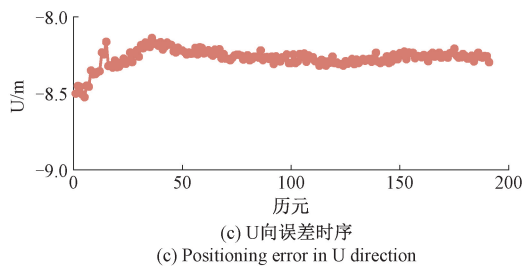


图 13 伪距单点定位误差时序

Fig. 13 Time series of pseudorange single point positioning error

基于图 10 的结果,可以看出当信号以 15°入射时,超表面与普通金属表面的载噪比峰值均出现在各自的理论最佳接收角度附近,分别满足超表面的非对称反射特性及普通金属表面的镜面反射特性,两种表面的反射信号质量均得到了验证。接下来将超表面替换为普通金属表面进行相同场景下的定位实验,以对比定位精度。

在实验中保持北斗信号入射角度为 15°,在接收角度为 15°、接收距离为 2.9 m 处采集反射信号并进行伪距单点位置解算,得到 N、E、U 3 个方向上的 RMSE 为 4.273、2.141、11.004 m,与超表面的定位误差对比如图 14 所示。从图 14 的结果可以看出,在同样的 NLOS 环境下,超表面与普通金属表面在各自接收信号质量最佳的角度下的伪距单点定位精度无明显差异,进一步验证了超表面定位结果的合理性及超表面辅助 GNSS 定位的可行性,同时,超表面的非对称反射特性能实现 GNSS 信号定向覆盖,有效克服多种 NLOS 环境对定位服务的不利影响。

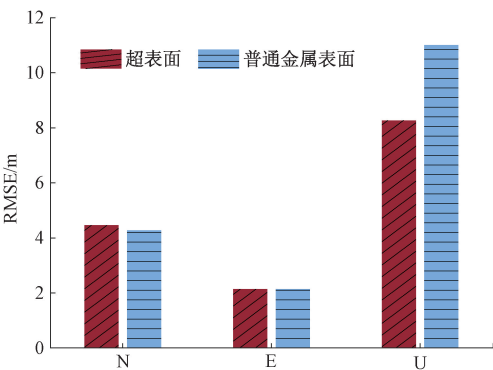


图 14 超表面及普通金属表面的伪距单点定位误差对比

Fig. 14 Positioning result of metasurface and common metal surface

4 结 论

本文从改变 GNSS 信号信道环境的角度出发,提出

使用超表面作为中继对 GNSS 信号进行波束赋形,实现定向改变 GNSS 信号的反射角度。首先设计了以 15°作为信号入射角、30°作为信号出射角的超表面,通过仿真初步得到了与理论分析一致的波束赋形效果。接下来在暗室进行实测实验,数据表明经超表面反射的北斗 B1 信号在 30°处接收信号质量最佳,与普通金属反射面相比有着更明显的反射角度规律,并给出了平面内接收信号强度的分布情况。最后评估了超表面辅助的 GNSS 伪距单点定位误差,并与普通金属表面的伪距单点定位精度作了对比,验证了超表面辅助的 GNSS 定位的可行性,有望为城市中视距链路严重阻塞的复杂场景定位提供参考。

基于本文探索,未来可以利用有源动态超表面实时切换波束偏转角度,将导航信息与通信信息融合,并借助更加精确的几何归算方法,将导航服务环境拓展到复杂城市环境及室内,实现动态目标跟踪及卫星定位。

参考文献

[1] 陈秀德,刘惠,蔚保国,等. 北斗/GNSS 广域精密定位技术与服务:现状与展望[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版),1-21[2024-07-09].
CHEN X D, LIU H, YU B G, et al. Beidou/GNSS wide-area precise positioning technology and service: Current situation and prospects[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-21[2024-07-09].

[2] TEUNISSEN P, MONTENBRUCK O. Springer handbook of global navigation satellite systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017.

[3] 李星星,张伟,袁勇强,等. GNSS 卫星精密定轨综述:现状、挑战与机遇[J]. 测绘学报,2022,51(7):1271-1293.
LI X X, ZHANG W, YUAN Y Q, et al. Review of GNSS precise orbit determination: Status, challenges, and opportunities[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2022,51(7):1271-1293.

[4] 舒宝,刘晖,王利,等. 区域参考站网支撑的 PPP 和 RTK 一体化服务及其性能[J]. 测绘学报,2022,51(9):1870-1880.
SHU B, LIU H, WANG L, et al. PPP and RTK integrated service method and performance based on regional reference station network[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2022, 51(9): 1870-1880.

[5] 张继海,董绍武,卢望,等. 北斗卫星天线相位中心改正正在 PPP 中的应用研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(7):90-96.

- ZHANG J H, DONG SH W, LU J, et al. Study on the application of BeiDou satellite antenna phase center correction in PPP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(7):90-96.
- [6] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016,45(5):505-510.
- YANG Y X. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2016,45(5):505-510.
- [7] 宋伟伟,林巍,楼益栋,等. 北斗+5G 时空基准的 TDOA 定位方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023,48(7):1170-1179.
- SONG W W, LIN W, LOU Y D, et al. TDOA positioning with BDS + 5G space-time datum[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023,48(7):1170-1179.
- [8] 张锦荣,王康谊,张云逸,等. 基于北斗/GPS 的水中应急定位系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(6):87-93.
- ZHANG J R, WANG K Y, ZHANG Y Y, et al. Design of underwater emergency positioning system based on BD/GPS[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021,40(6):87-93.
- [9] 田哲铭,李旭,胡悦,等. 城市峡谷下视觉辅助的 GNSS/INS 多阶段定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(4):217-225.
- TIAN ZH M, LI X, HU Y, et al. Multi-stage localization method based on camera-aided GNSS/INS integration in urban canyon areas [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(4):217-225.
- [10] 熊儒菁,张佳楠,王福海,等. 无线通信中智能超表面设计综述[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023,51(9):1-32.
- XIONG R J, ZHANG J N, WANG F H, et al. Designing reconfigurable intelligent surfaces for wireless communication: A review [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023,51(9):1-32.
- [11] 王哲飞,张晋滔,陈鹏飞,等. 工作频率可重构的多层超表面设计[J]. 电子测量技术, 2024,47(7):28-33.
- WANG ZH F, ZHANG J T, CHEN P F, et al. Multi-layer meta-surface design with reconfigurable operating frequency[J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(7):28-33.
- [12] TANG W K, CHEN M ZH, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1):421-439.
- [13] ZHANG G L, ZHANG D H, HE Y, et al. Multi-person passive WiFi indoor localization with intelligent reflecting surface[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023,22(10):6534-6546.
- [14] 尚立,李毅超,蔡硕,等. 基于 IRS 辅助的北斗+5G 融合定位[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(24):137-143.
- SHANG L, LI Y CH, CAI SH, et al. Beidou + 5G fusion positioning based on IRS assistance [J]. Power System Protection and Control, 2022,50(24):137-143.
- [15] 李伟,李祺,高杨. 基于 PIN 二极管设计的一种进行波束扫描的超表面天线 [J]. 电子测量技术, 2022, 45(24):1-8.
- LI W, LI Q, GAO Y. Metasurface antenna design based on PIN diodes for beam scanning[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(24):1-8.
- [16] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054):333-337.
- [17] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10):e218.
- [18] MA Q, CUI T J. Information metamaterials: Bridging the physical world and digital world [J]. PhotonX, 2020, 1(1):1.
- [19] KIM J, PARK J, KANG J. RIS channel modeling based on 3GPP channel model [C]. 2023 14th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Korea, 2023: 1593-1594.
- [20] KEYKHOSRAVI K, DENIS B, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Leveraging RIS-enabled smart signal propagation for solving infeasible localization problems: Scenarios, key research directions, and open challenges [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2023, 18(2):

20-28.

[21] ZHANG H B, ZHANG H L, DI B, et al. RSS fingerprinting based multi-user outdoor localization using reconfigurable intelligent surfaces[C]. 2021 15th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), Xiamen, China, 2021: 167-172.

[22] ZHAO S B, LIN Y, WU L L, et al. Recursive UE localization for a multi-RIS-assisted wireless system in an obstacle-dense environment[C]. 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2023,1-5.

[23] ZHAO Q CH, GONG W F, HOU T W, et al. Global navigation satellite system (GNSS): A reconfigurable intelligent surface (RIS)-aided approach[C]. 2022 IEEE Global Communications Conference; GLOBECOM 2022, Rio de Janeiro, Brazil, 2022: 3162-3167.

[24] XUE SH X, ZHAO J N, YANG W K. A modified channel model for the MIMO system deployed RIS elements with imperfect surface[C]. 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Glasgow, United Kingdom, 2024: 1-3.

[25] 张信歌. 可编程超表面电磁实时调控与应用[D]. 南京:东南大学, 2021.

ZHANG X G. Electromagnetic real-time manipulation and the applications of programmable metasurfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

作者简介



吴竹君,2023 年于北京科技大学获得学士学位,现为东南大学硕士研究生,主要研究方向为超表面辅助的 GNSS 定位。

E-mail:wuzhujun@seu.edu.cn

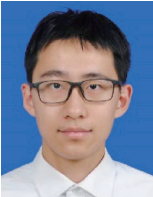
Wu Zhujun received her B.Sc. degree in 2023 from University of Science and Technology Beijing. Now she is a M.Sc. candidate in Southeast University. Her main research interests include metassurface-assisted GNSS positioning.



潘树国(通信作者),2007 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学教授,博士生导师,主要研究方向为 GNSS 高精度定位与环境智能感知。

E-mail:psg@seu.edu.cn

Pan Shuguo (Corresponding author) received his Ph.D. degree in 2007 from Southeast University. Now he is a professor in Southeast University. His main research interests include GNSS high-precision positioning and intelligent perception of the environment.



孙健恺,2023 年于西安电子科技大学获得学士学位,现为东南大学信息科学与工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为电磁超表面设计。

E-mail:220230746@seu.edu.cn

Sun Jiankai received his B.Sc. degree in 2023 from Xidian University. Now he is pursuing his M.Sc. degree in Southeast University. His main research interests include metasurface and its applications.