

一种小型导航阵列天线宽波束赋形设计及验证

宋肖, 张英杰, 李润, 徐少波, 张明程, 陈晓阳, 韩帅

(中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081)

摘要: 阵列波束赋形技术是一种利用多个微小天线单元来形成波束并指向特定方向的阵列信号处理技术; 这种技术通常用于通信系统、雷达、声纳中, 以提高信号接收和发送的效率; 传统的阵列天线一方面阵列规模形态较大, 难以满足导航终端小型化的要求, 另一方面, 卫星导航信号遍布于空中的各个方位和俯仰方向, 传统阵列天线波束宽度较窄, 难以覆盖接收空中的大部分卫星接收信号; 现提出一种小型导航阵列天线宽波束赋形设计实现技术, 通过合理的波束宽度设计, 达到单个波束对大部分空中卫星导航信号实现增强的目的; 通过理论计算和仿真分析, 结合卫星导航信号的实际空中角度分布情况, 得到四阵元天线阵元间距为 $1/3$ 波长时, 性能达到相对最优, 可以对俯仰角 30° 以上的卫星导航信号实现波束增益; 通过工程设计验证和测试表明, 阵元间距为 $1/3$ 波长的四阵元天线可以有效带来卫星导航信号载噪比的提升, 提升天线的接收性能。

关键词: 卫星导航; 阵列信号; 宽波束赋形; 载噪比; 小型化

Design and Verification of a Small Navigation Array Antenna with Wide Beam Shaping

SONG Xiao, ZHANG Yingjie, LI Run, XU Shaobo, ZHANG Mingcheng,
CHEN Xiaoyang, HAN Shuai

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Array beam forming technology is an array signal processing technique that utilizes multiple small antenna units to form a beam and point in a specific direction. This technology is commonly used in communication systems, radar, and sonar to improve the efficiency of signal reception and transmission. On the one hand, traditional array antennas have a large scale and shape, which makes it difficult to meet the requirements of miniaturization of navigation terminals. On the other hand, satellite navigation signals are distributed in various azimuth and elevation directions in the air. The beam width of traditional array antennas is narrow, making it difficult to cover most satellite reception signals in the air. A small navigation array antenna wide beam shaping design technology is proposed, which aims to enhance most aerial satellite navigation signals with a single beam through reasonable beam width design. Through theoretical calculations and simulation analysis, combined with actual aerial angle distribution of satellite navigation signals, the results show that with the spacing between four antenna elements being $1/3$ wavelength, the performance reaches relatively optimal, and the beam gain can be achieved for satellite navigation signals with an elevation angle of more than 30° . Engineering verification and testing show that four element antenna with a spacing of $1/3$ wavelength can effectively improve the carrier to noise ratio of satellite navigation signals and enhance the receiving performance of antennas.

Keywords: satellite navigation; array signal; wide beam shaping; carrier to noise ratio; miniaturization

收稿日期:2024-05-08; 修回日期:2024-06-17。

作者简介:宋肖(1992-),男,硕士研究生。

引用格式:宋肖,张英杰,李润,等.一种小型导航阵列天线宽波束赋形设计及验证[J].计算机测量与控制,2025,33(6):232-239.

0 引言

北斗三号卫星导航系统于 2020 年 7 月 31 日开通运行, 完成了 3GEO+3IGSO+24MEO 满星座 30 颗卫星的在轨运行。在全球范围内提供米级基本导航服务和短报文服务, 在我国及周边地区提供区域短报文服务和重点服务。北斗三号全球卫星导航系统在完好性、连续性、可用性等方面得到了进一步增强, 能够提供更安全可信、稳定连续的时空信息综合服务能力, 与美国全球定位系统、俄罗斯格洛纳斯系统等系统共同进入了新的发展阶段^[1]。卫星导航系统的推广和应用在现代军事和经济中具有重要的战略地位, 卫星导航系统已经成为先进武器装备必需的技术保障, 对于战略格局走向起着举足轻重的作用^[2]。

导航信号到达地表的信号强度十分微弱, 信号强度参考值为 -133 dBm, 遮挡、电磁干扰等原因很容易对导航信号造成较大的影响。当导航受到遮挡、电磁干扰时, 信号载噪比会下降, 从而导致接收机定位精度、授时精度等指标下降, 导航终端的服务能力下降^[3]。针对以上问题, 通过将阵列天线波束赋形技术应用于卫星导航终端, 提高卫星导航终端对导航信号接收增益, 进而提升导航终端在遮挡、复杂电磁环境中的服务能力和可靠性。

阵列波束赋形技术是智能多天线中的核心技术之一, 是一种基于阵列天线的信号预处理相关技术^[4], 该技术被广泛应用于信号的收发处理, 它通过将多个小天线进行合成处理, 在空间中形成增益集中, 实现对信号的增强接收和集中发送, 能够大幅度提升天线的性能^[5], 该技术在通信、雷达、声呐等领域有着广泛应用^[6-8]。国内外专家针对阵列波束赋形技术进行了多方面研究, 提出不同的解决方案^[9]。

自适应波束形成技术在导航信号处理中已经开始应用, 国内外专家针对导航信号的特殊性, 进行了多波束技术的研究, 提出不同的解决方案。多波束是根据不同导航卫星的方位俯仰信息, 同时根据信号统计特征, 获得不同的阵列权值, 在空间中形成多个窄波束分别指向不同的卫星, 获得指向增益。文献 [10-12] 分别在盲多波束、固定多波束与卫星聚类策略上给出了波束指向实验仿真, 达到了提高导航信号载噪比的目的。但是目前多波束算法需要先验信息, 计算过程复杂, 工程应用难度较大。基于复杂度的考虑, 目前多波束研究以 12 个波束为主, 可以对 12 颗卫星形成指向增益^[13], 根据目前导航卫星星座, 难以覆盖大部分卫星, 影响后续接收机的定位解算。

本文基于阵列波束赋形的基本思路, 针对多波束需

要先验信息, 计算过程复杂, 覆盖卫星数少, 难以工程应用等问题, 结合导航卫星星座分布角度, 提出一种小型导航阵列天线宽波束赋形设计技术, 通过优化阵列间距设计, 使得阵列波束宽度可以覆盖导航卫星星座的绝大部分卫星, 带来波束增益, 提升天线的接收性能。该方法只需要利用单波束便可以提高俯仰角 30° 以上卫星的载噪比, 实现简单, 具有普适性和低成本性。

1 阵列方向图波束宽度

1.1 方向图波束宽度论证

对于阵列天线来说, 阵列输出的绝对值与来波方向之间的关系称为天线的方向图。阵列输出的直接相加即静态方向图, 如果需要对波束的指向进行约束, 可以通过控制加权的相位来实现。本文首先以线性阵为例, 对方向图的波束宽度进行论证分析。

通常对于有 M 个各向同性的传感器均匀排布于一条直线上的阵列称为均匀等距线阵 (ULA, uniform linear array), 图 1 为典型的均匀线阵空间示意图。图中相邻两个传感器之间的间距为 d , 来波方向与线阵垂直方向的夹角为 θ , 各个传感器的信号进入自适应阵列处理器^[14]进行加权相加, 得到最终的输出。 $x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)$ 表示各个传感器通道输出的接收信号, w_1, w_2, \dots, w_M 分别为对各个传感器通道的加权值, $y(k)$ 表示整个线性阵列的合路输出, 下面我们只从天线方向图的角度进行线性阵列输出的论证。

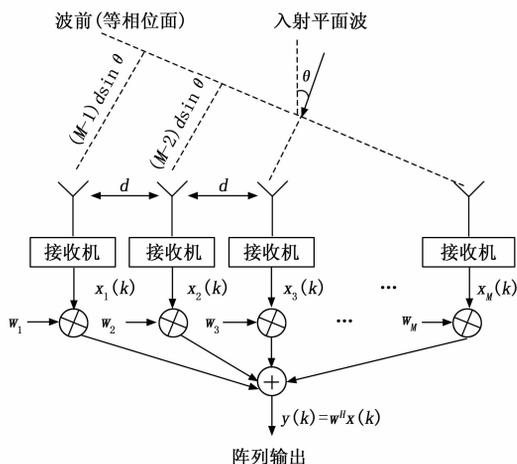


图 1 均匀线阵空间接收示意图

阵列的天线方向图输出与信号的输入角度有关, 忽略信息 $x_M(k)$ 本身实信号的影响, 只考虑入射信号角度的影响, 阵列方向图的输出只与信号的导向矢量 $\mathbf{a}(\theta)$ 和权矢量 \mathbf{W} 有关, 通过上图的阵列输出推导可以得到阵列信号输出的方向图函数为式 (1), 可以看出阵列方向图函数为随角度变化的函数, 所以在不同的角度会输

出不同的增益, 进而形成天线的阵列方向图^[15]。

$$F(\theta) = \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta) \quad (1)$$

式中, $[\cdot]^H$ 表示共轭转置, 权矢量 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$, $\mathbf{a}(\theta)$ 为方向向量, 方向向量 $\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j2\pi^{\frac{d}{\lambda}} \sin\theta}, \dots, e^{j(M-1)2\pi^{\frac{d}{\lambda}} \sin\theta}]^T$ 。对方向图表达式 (1) 取模的平方并进行归一化可以得到归一化空间阵列方向图如式 (2) 所示。我们通过对权矢量 \mathbf{W} 进行控制可以在想要的方向上形成更高的天线增益, 进而在方向图上表现为波束状态。

$$G(\theta) = \frac{|F(\theta)|^2}{\max |F(\theta)|^2} \quad (2)$$

通常约定阵列垂直方向为 0° , 顺时针方向为正方向, 逆时针方向为负方向, 则 $\theta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ 。对 ULA 阵进行均匀加权, 则权矢量的取值为 $\mathbf{W} = [1, 1, \dots, 1]^T$, 将权矢量代入式 (1) 可以得出式 (3), 该权矢量会在 0° 方向形成最大增益, 然后随着角度顺时针和逆时针方向变动, 天线增益逐渐降低, 即形成以 0° 为中心的主波束。

$$F(\theta) = |\mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta)| = \frac{1}{M} \left| \sum_{k=1}^N e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d(k-1) \sin\theta} \right| = \left| \frac{\sin(\pi d M \sin\theta / \lambda)}{M \sin(\pi d \sin\theta / \lambda)} \right| \quad (3)$$

主波束宽度通常被定义为半功率波束宽度, 即在该角度来向信号在阵列合成的功率强度为阵列合成最大功率的一半, 则此时阵列方向图增益为最大增益的一半, 由式 (2) 定义可以得出:

$$G(\theta) = \left| \frac{\sin(\pi d M \sin\theta_{0.5} / \lambda)}{M \sin(\pi d \sin\theta_{0.5} / \lambda)} \right|^2 = 0.5 \quad (4)$$

式中, $\theta_{0.5}$ 表示阵列输出相对于最大输出功率下降为一半时对应的角度, 对式 (4) 两边进行开方计算, 可以进一步得出:

$$\frac{\sin(\pi d M \sin\theta_{0.5} / \lambda)}{M \pi d \sin\theta_{0.5} / \lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

式中, 左边为辛克函数, $\sin(x)/x = 1/\sqrt{2}$, 通过查表可以得到 $x = 1.39$, 即 $M \pi d \sin\theta_{0.5} / \lambda = 1.39$, 则有:

$$\theta_{0.5} \approx \sin\theta_{0.5} = \frac{1.39\lambda}{\pi d M} (\text{rad}) = \frac{25.35\lambda}{dM} (^\circ) \quad (6)$$

通过式 (6) 分析可得主波束宽度为:

$$\theta_{nb} = 2\theta_{0.5} = \frac{50.7\lambda}{dM} (^\circ) \quad (7)$$

1.2 方向图波束宽度仿真分析

由式 (7) 可以看出, 阵列天线方向图的波束宽度主要与阵元间距和阵元个数有关, 下面分别从阵元个数和阵元间距两方面对波束宽度进行仿真分析。假设阵元间距为 $\lambda/2$, 阵元个数 M 分别为 10 和 20 时阵列方向如图 2 (a) 所示; 假设阵元个数为 20, 阵元间距 d 分别

为 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 时阵列方向如图 2 (b) 所示。从图中可以看出, 阵元间距一定时, 阵元个数越少, 波束宽度越宽, 阵元个数一定时, 阵元间距越小, 波束宽度越宽, 符合式 (7) 的推导。

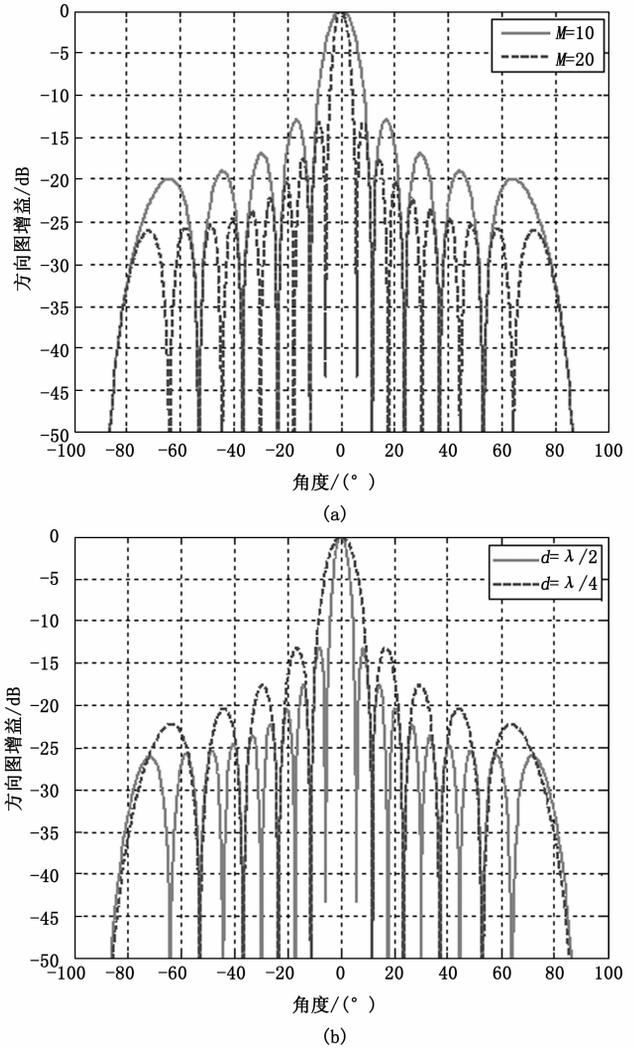


图 2 均匀加权 ULA 阵阵列方向图仿真

通过计算和仿真可以看出, 当接收信号频率 (即接收信号波长) 一定时, 波束宽度主要与阵元个数和阵元间距有关, 阵元个数越少, 阵元间距越小波束宽度越宽。通常阵列信号在雷达、通信领域的应用有很强的方向性, 即在某个方向形成高增益窄波束, 达到提高雷达、通信的发射接收能力。由于导航卫星在空间分布广, 高增益窄波束难以满足大部分卫星信号的接收。进而出现不少学者对于多波束的研究, 形成多个波束分别指向不同的导航卫星, 但是该研究计算复杂, 工程应用难度大。本文基于上述研究, 希望通过优化布阵设计, 在方向图上形成宽波束, 通过单个波束对大部分角度导航卫星形成增益, 提高导航天线的接收性能, 适合工程应用的推广。

2 小型导航阵列建模和仿真

2.1 小型导航阵列建模

导航阵列布阵要充分考虑其工程应用, 对于导航阵列的布阵要充分小, 便于导航终端的应用^[16], 从阵面尺寸出发, 建模主要考虑平面阵, 它由 M 个具有任意方向性的阵元按任意排列构成。同时设有 K 个卫星导航信号 ($M > K$) 分别以来向 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K$ 入射到该平面阵, 如图 3 所示。其中 $\theta_i = (\theta_i, \varphi_i), i = 1, 2, \dots, K$ 。 θ_i 和 φ_i 分别是第 i 个导航入射信号的俯仰角和方位角, $0 \leq \theta_i < 90^\circ, 0 \leq \varphi_i < 360^\circ$ 。

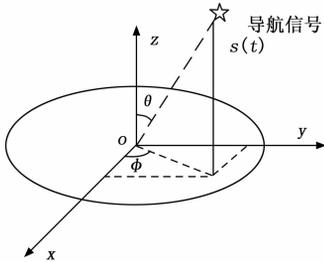


图 3 波达方向示意图

通过上述建模可以得到, 阵列第 m 个阵元的输出可表示为:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^K s_i(t) e^{-j\omega_s \tau_m(\theta_i)} + n_m(t) \quad (8)$$

$s_i(t)$ 为入射到阵列的第 i 个导航卫星的导航信号, $n_m(t)$ 为第 m 个阵元的加性噪声, $\tau_m(\theta_i)$ 为来自 θ_i 方向的导航信号到达参考点的时间延迟, 所有卫星导航信号在阵列中的各单元的输出可以表示成如下矩阵形式:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}(\theta_i) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (9)$$

$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 为在各个阵元的导航信号合路输出, 各个阵元的加性噪声 $\mathbf{N}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$, 方向矩阵 $\mathbf{A}(\theta_i) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$ 代表所有来向卫星导航信号的方向向量, 其中 $a(\theta_i)$ 表示来向为 θ_i 的导航信号的方向向量, 如公式 (10) 所示:

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [e^{-j\omega_s \tau_1(\theta_i)}, e^{-j\omega_s \tau_2(\theta_i)}, \dots, e^{-j\omega_s \tau_u(\theta_i)}] \quad (10)$$

此次布阵为均匀方阵如图 4 所示, 阵元间距为 d , 将原点所在阵元作为参考阵元, 则可以计算出第 mn 阵元相对于参考阵元的延时为:

$$\tau_{mn}(\theta_i) = \frac{(m-1)d \sin \theta_i \cos \varphi_i + (n-1)d \sin \theta_i \sin \varphi_i}{c} \quad (11)$$

阵列的合路输出可以表示为 $y(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t)$, 小阵列宽波束赋形设计的目的为求解合适的权值 \mathbf{W} , 保证在更宽的俯仰和方位范围内形成天线增益。通俗来讲, 保证卫星信号来向 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K$ 的大部分导航卫星

信号在阵列中合成输出相比单个阵元的天线增益要高。这样可以保证在合适的权值下, 大部分卫星不同来向的信号载噪比有所提升, 进而提升整个接收机的性能。

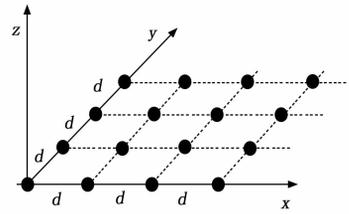


图 4 布阵示意图

这里再次进行本文宽波束赋形和多波束算法进行对比, 多波束即在上述的模型中形成多个权值矢量 \mathbf{W} 分别指向不同的卫星导航信号, 形成多个波束输入给相应的接收机通道, 假设形成 12 个波束, 则 12 个波束相当于要求解 12 个权值, 计算复杂, 工程应用难度大。本文通过单个宽波束覆盖 16 个或者更多角度的卫星导航信号, 使其在阵列天线中形成波束增益。

2.2 小型导航阵列应用影响分析

RNSS 定位解算原理为从基带芯片获取导航电文、伪距测量值、载波测量值、信号载噪比, 解析导航电文获取卫星星历, 计算可视卫星的位置、高度角、俯仰角。对各项误差进行误差修正, 建立误差方程进行定位解算处理^[17], 然后输出用户位置提供位置服务。在实际使用中, 可视卫星数会超过 6 颗, 就可以获取用户位置, 冗余卫星信息保证了接收机进行自主完好性检测的需要, 同时提高定位精度^[18]。对于北斗三号系统, 以民用信号 B3I 频点为例, 当前空间中的可见卫星数量达到 20 颗以上, 如图 5 所示。当前接收机的通道个数一般为 16 个, 参与定位卫星个数同样为 16 个, 所以本文小型导航阵列天线的宽波束的目的为通过波束宽度设计, 使得单个波束可以实现对可见卫星至少 16 个方向的卫星导航信号形成波束增益, 提高卫星信号的载噪比和接收灵敏度, 使得导航终端在受到电磁干扰和遮挡时

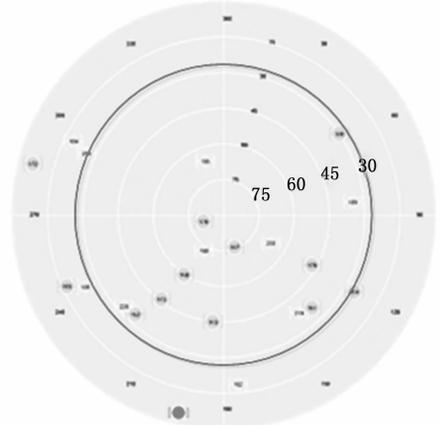


图 5 空间可见卫星分布图

具有更强的适应性。

导航接收机的俯仰角定义与图 3 中定义的 θ 角互补, 即导航卫星信号与 xy 轴组成的平面(天线平面)垂直时, 卫星信号的角度为 90° , 与 xy 轴组成的平面平行时, 卫星信号的角度为 0° 。从图 5 中可以看出, 俯仰角 30° 以上的卫星个数可以满足 16 个, 所以本文的波束设计目的为保证阵列波束在图 3 所建模型中俯仰角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 会产生正增益, 相对于单天线接收有增益提升, 从而提升整个天线的接收性能。

在第 1 节中, 本文已经对阵列波束宽度的影响因素进行了详细推导和分析, 同时进行了仿真分析。矩形阵列为均匀线性阵列的推广和延伸。所以在第 1 节中的推导和分析同样适用于矩形阵列。矩形阵列的波束宽度同样决定于阵元个数和阵元间距, 阵元个数越少, 阵元间距越小, 波束宽度越宽。但是阵列波束相对于单个阵子的最大增益决定于阵元个数, 阵列最大增益与阵元个数之间的关系为 $G_{\max} = 10 * \log(M)$ 。对于 4 阵元天线来说, 阵列波束带来的最大增益为 6 dB, 对于 9 阵元天线, 阵列波束带来的最大增益为 9.5 dB。考虑阵元数在波束宽度的损失和带来增益的综合影响分析, 同时结合导航终端小型化的特点, 本文方案考虑 4 阵元实现方案。

在阵元个数确定的情况下, 对于本文来说, 影响波束宽度的因素转为单一的阵元间距, 现在对阵元间距的情况进行分析。阵列布阵时, 阵列间距要求会小于等于半波长, 从空间理论采样出发, 当阵元间距大于半波长时, 会出现空间采样模糊, 空间模糊在方向图上表现为会出现与主瓣增益相同的多个旁瓣, 我们称之为栅瓣^[19]。雷达和通信中阵列天线的阵元间距一版为半波长, $d = \lambda/2$ 时分辨率较高, 这样可以保证在没有栅瓣的情况下, 主瓣宽度最小, 且副瓣还没有上升, 效率最高。

本文要保证波束宽度足够宽, 当阵元间距为半波长时, 难以保证俯仰角低仰角的波束增益, 对于导航信号来说, 这样可能只会对部分卫星信号实现信号的能量增加, 对部分卫星信号会造成信号的能量衰减, 难以达到整个系统性能的提升。所以本文的阵元间距要尽量小, 保证对大部分卫星信号实现波束增加的效果, 上文中已经论述, 只要保证俯仰角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 卫星的波束增益, 就可以带来系统性能的提升。

当天线阵元置于阵列中后, 就会产生互耦, 天线阵元间的相互耦合会降低天线阵列系统的性能。这种互耦效应会直接带来如下影响: 旁瓣电平升高、波束指向偏离等^[20]。天线阵元之间的互耦影响主要跟天线阵元之间的距离有关, 当两个天线阵元距离比较远时, 天线之

间的能量耦合是很小的, 一个天线对另一个天线的激励电流以及波瓣的影响均可以忽略不计。当天线靠得比较近的时候, 其间的耦合会变大。综合上述分析, 本文的阵元间距的取值需要综合多种因素考虑, 不能单独考虑波束宽度, 使得阵元间距足够小, 而忽略阵元之间的互耦的影响。本文阵元间距的选择, 首先保证俯仰角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的天线增益为正, 在这个条件下, 再去降低和消除阵元之间的互耦影响。

2.3 小型导航阵列天线方向图仿真分析

下面基于 4 阵元方阵进行建模, 对天线方向图进行仿真分析, 假设 4 阵元天线以矩形阵的方式均匀分布于平面上, 对天线阵的方向图进行仿真分析。图 6 中, 图 (a) 为 $1/2$ 波长时的归一化天线方向图, 图 (b) 为 $1/3$ 波长时对应的归一化天线方向图。图中已经分别将俯仰角 60° 方向, 方向图归一化增益最小的 2 个点标出, 可以看出, 当阵元间距为 $1/2$ 波长时, 俯仰角 60° 方向最小归一化增益为 -8.16 dB, 当阵元间距为 $1/3$ 波长时, 俯仰角 60° 方向最小归一化增益为 -5.78 dB。上文中已经提到 4 阵元天线最大可以带来最大 6 dB 的波束增益。所以, 当阵元间距为 $1/3$ 波长时, 可以满足我们的需求, 加上波束的合成增益, 可以保证俯仰角 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的波束增强。

上文通过计算分析与仿真论证, 从阵元个数和阵元间距两方面确定了实施方案, 本文在此基础上采取相应的补偿措施来克服由于互耦带来的波束恶化。本文应用共面紧凑型电子带隙 (UC-EBG) 加载在阵列的地板上, 该结构不存在导电过孔, 利用金属贴片结构上的这种复杂性来提供电容和电感。其中, UC-EBG 结构紧凑, 更加适合阵列环境。由于 UC-EBG 存在频率带隙, 因而可以降低表面波, 阻止天线阵元之间的电磁波传播, 降低天线阵元之间的互耦^[21]。在上面的措施基础之上, 采用阵元间加金属隔板或单元口面加介质薄板, 可起到随扫描角而变的补偿效应, 达到在一定扫描范围改善单元阻抗匹配的目的, 进而减小阵元之间的互耦影响, 减小对于波束成形的恶化。

3 方案验证

本方案验证以北斗导航信号 B3I 频段为例, 按照上述仿真分析得到的结论, 我们优化布阵设计, 得到阵列天线如图 7 所示, 阵元间距为 78.9 mm, 为 B3I 频段波长的 $1/3$, 整个天线大小为 $120 \text{ mm} * 120 \text{ mm}$, 天线整机尺寸较小, 天线的平台适应性较好, 很容易展开应用和推广。同时为了减小阵元之间的互耦影响恶化, 阵元之间增加金属隔板。通过对天实测收星, 验证阵列天线波束带来的性能提升。为了验证第 2 节的 4 阵元建模的

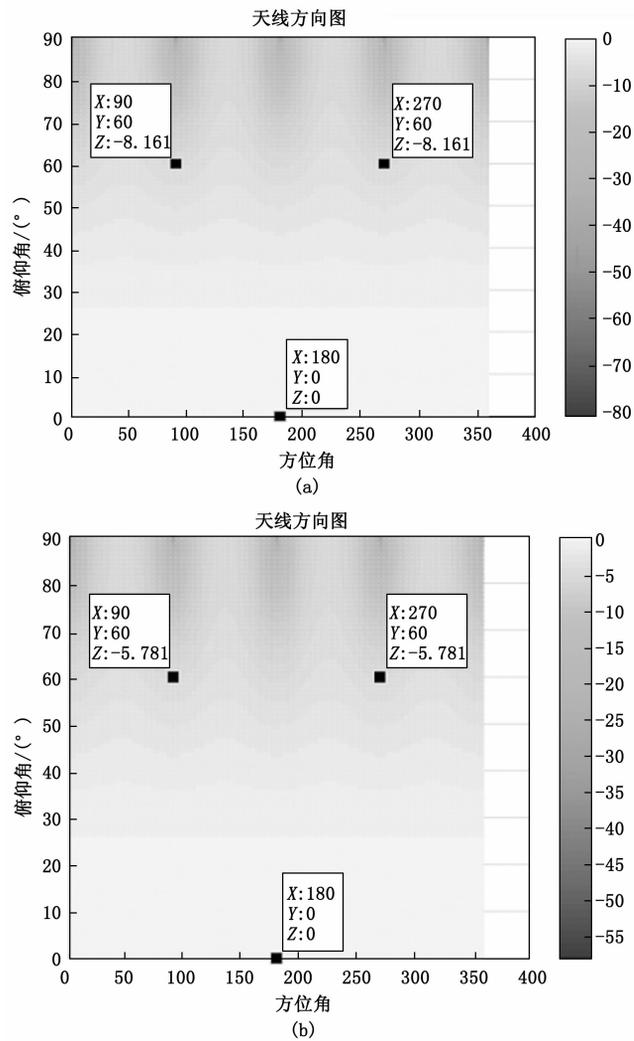


图 6 不同阵元间距天线方向图仿真

理论和仿真分析, 我们同步设计了阵元间距为半波长的导航阵列, 作为对比测试样机。

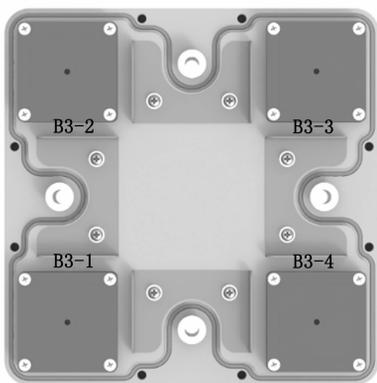


图 7 阵列设计布阵效果图

载噪比是衡量接收机的重要指标, 提高设备的载噪比相当于提高导航终端设备的整机性能, 在本文中, 载噪比的提升同样代表着波束增益的形成, 所以本次试验

以卫星导航信号载噪比作为性能评价的依据。为了保证验证的唯一性, 本次试验验证的数据来自同一个接收机。试验数据为本文设计的 $1/3$ 波长的阵列天线、 $1/2$ 波长的阵列天线和单个阵元天线搭配上述接收机的采样数据。为了验证本方案的有效性, 我们将上述 3 种天线在同一时间点的载噪比进行对比分析。由于导航卫星的角度分布随时间会变化, 为了保证试验数据的充分性和有效性, 本次试验分别在上午、下午 2 个时间点进行上述 3 种天线收星载噪比采集对比分析。

上午时间点卫星信号来向及收星载噪比如表 1 所示, 收星载噪比对比折线如图 8 所示。俯仰角 30° 以上的导航卫星个数为 16 个, 相对于单阵元, $1/3 \lambda$ 布阵的收星载噪比均有所提升, 最大提升载噪比 6 dB。 $1/3 \lambda$ 布阵比单阵元载噪比平均高 2.5 dB 左右, 比 $1/2 \lambda$ 布阵载噪比平均高 1.5 dB 左右。实测结果表明, $1/3 \lambda$ 布阵天线宽波束赋形设计对俯仰角 30° 以上卫星信号增益提升效果显著, 达到预期效果。

表 1 卫星信号来向及收星载噪比(上午) dB

卫星号	角度/ $(^\circ)$ (俯仰, 方位)	单阵元	$1/2\lambda$ 布阵	$1/3\lambda$ 布阵
161	(35,137)	39	40	41
162	(33,222)	37	36	39
163	(44,186)	36	40	40
164	(35,120)	42	42	44
165	(16,245)	44	42	46
166	(21,201)	37	34	35
167	(77,37)	43	48	49
168	(18,171)	37	40	42
169	(29,210)	40	35	36
170	(65,308)	41	46	46
180	(7,76)	34	30	31
184	(34,314)	43	42	46
186	(64,260)	46	50	51
189	(35,51)	45	45	48
195	(73,298)	46	51	50
198	(30,165)	40	38	42
200	(67,21)	46	52	52
204	(36,252)	42	45	45
205	(36,168)	42	45	46
219	(36,143)	41	42	43
220	(32,227)	45	44	47

下午时间点卫星信号来向及收星载噪比如表 2 所示, 收星载噪比对比折线如图 9 所示。俯仰角 30° 以上的导航卫星个数为 17 个, 相对于单阵元, $1/3 \lambda$ 布阵的收星载噪比均有所提升, 最大提升载噪比 6 dB。 $1/3 \lambda$ 布阵比单阵元载噪比平均高 3 dB 左右, 比 $1/2\lambda$ 布阵载噪比平均高 1.5 dB 左右。实测结果表明, 下午时间点 3

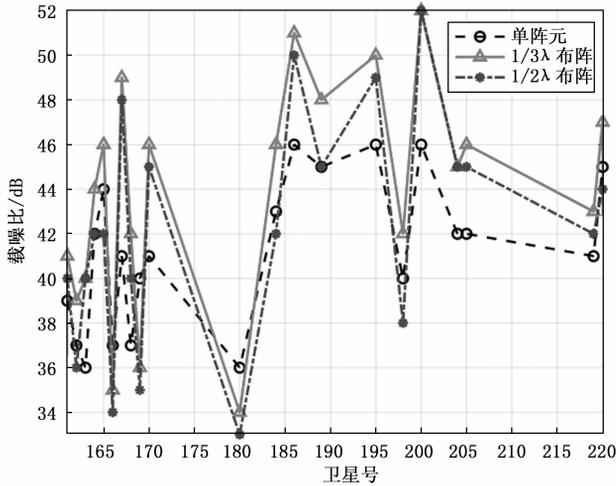


图 8 收星载噪比对比图 (上午)

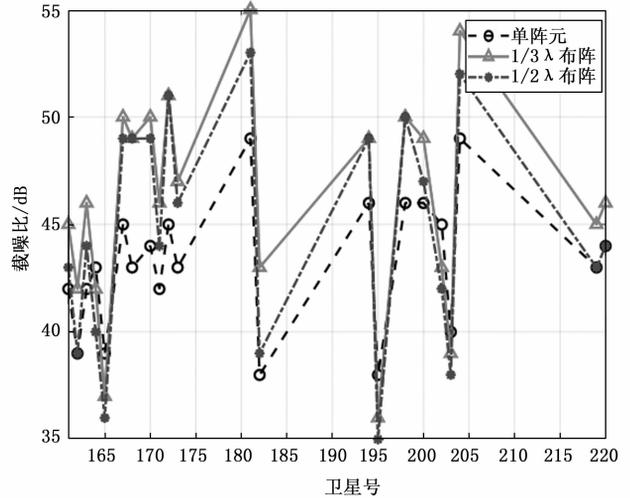


图 9 收星载噪比对比图 (下午)

种天线收星载噪比趋势相同。1/3 λ 布阵宽波束赋形设计提升卫星信号增益显著。

表 2 卫星信号来向及收星载噪比(下午) dB

卫星号	角度/(°)(俯仰,方位)	单阵元	1/2λ 布阵	1/3λ 布阵
161	(37,135)	42	43	45
162	(35,223)	39	39	42
163	(46,186)	42	44	46
164	(27,119)	43	40	42
165	(17,246)	39	36	37
167	(56,185)	45	49	50
168	(67,273)	43	49	49
170	(64,214)	44	49	50
171	(42,314)	42	44	46
172	(71,71)	45	51	51
173	(55,258)	43	46	47
181	(68,144)	49	53	55
182	(39,50)	38	39	43
194	(66,327)	46	49	49
195	(6,118)	38	35	36
198	(76,304)	46	50	50
200	(52,163)	46	47	49
202	(26,199)	45	42	43
203	(20,306)	40	38	39
204	(50,106)	49	52	54
219	(38,141)	43	43	45
220	(34,229)	44	44	46

4 结束语

面对导航终端小型化需求,通过优化阵列设计,提出了一种小型导航阵列宽波束赋形设计实现技术。本文构建了小型导航阵列模型,设计了实物阵列天线。通过对不同布阵天线仿真分析和对天实测收星,验证了 1/3 波长布阵设计可以形成宽波束,有效提高俯仰角 30° 以上的卫星信号,平均提高载噪比 2.5 dB 以上,提高了

天线的接收性能,有助于推动工程应用。

参考文献:

- [1] 杨子辉, 薛 彬. 北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势 [J]. 导航定位学报, 2022, 10 (1): 1-14.
- [2] 龚佩佩, 郑 恒, 杨卓鹏, 等. 全球卫星导航系统性能标准及指标体系概述 [C] // 第四届中国卫星导航学术年会论文集, 2013: 49-53.
- [3] THOMBRE S, BHUIYAN M Z H, ELIARDSSON P. et al. GNSS threat monitoring and reporting: past, present, and a proposed future [J]. Journal of Navigation, 2018, 71 (3): 513-529.
- [4] 陈兴国, 刘建勇. 数字阵列技术的研究 [J]. 硅谷, 2012 (9): 98-100.
- [5] 王 昕, 姚艳军. 相控阵在卫星通信中的应用研究 [J]. 通信电源技术, 2021, 38 (2): 13-17.
- [6] 周 涛, 贾 鹏, 朱广运, 等. 相控阵天线波束赋形及信道测量实验平台开发 [J]. 实验技术与管理, 2021, 38 (9): 110-115.
- [7] HANS S, JOHN F R. Digital beamforming for radar system [J]. Microwave Journal, 1989, 32 (1): 121-136.
- [8] UR S R, JAWWAD A, ANWAAR M. et al. Beamforming techniques for MIMO-NOMA for 5G and beyond 5G: research gaps and future directions [J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2023, 43 (3): 1518-1548.
- [9] 刘 广, 汪 爽, 汪 井, 等. 基于粒子群算法的阵列天线波束赋形研究 [J]. 微波学报, 2023, 39 (3): 37-40.
- [10] 唐庆辉, 戴鑫志, 张 辉. 一种盲多波束形成 GNSS 天线阵抗干扰算法 [J]. 导航定位与授时, 2020, 7 (2): 132-138.
- [11] 马衍秀, 马忠志, 李晓东, 等. 一种卫星导航接收机固定多波束抗干扰方法 [J]. 国防科技大学学报, 2023,

- 25 (3): 36 - 40.
- [12] 郑雅萍, 赵璐璐, 龚文斌, 等. 基于动态聚类的卫星导航信号多波束抗干扰方法 [J]. 全球定位系统, 2021, 46 (2): 32 - 36.
- [13] 董李梅. 带波束指向的 GPS 抗干扰技术研究 [J]. 导航与定位授时, 2016, 3 (2): 53 - 58.
- [14] APPLEBAUM S P. Adaptive arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976, 24 (5): 585 - 598.
- [15] 王永良. 自适应阵列处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [16] 王梦双, 朱小奇, 丁克乾, 等. 小型化抗干扰导航天线研究 [J]. 遥测遥控, 2020, 41 (4): 28 - 33.
- [17] 谢 钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.
- [18] BORIO D, CLOSAS P. Robust transform domain signal processing for GNSS [J]. Navigation-Journal of the Institute of Navigation, 2019, 66 (2): 305 - 323.
- [19] 张小飞, 陈华伟, 仇小峰. 阵列信号处理及 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [20] 段雪峰, 王 凯, 李 健, 等. 阵列天线互耦效应研究 [J]. 天文研究与技术, 2022, 19 (6): 606 - 612.
- [21] 司晴晴, 曾庆生, 石 源, 等. 一种低互耦圆形微带阵列天线 [J]. 现代雷达, 2023, 45 (9): 38 - 45.
- IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2023, 31 (6): 861 - 873.
- [13] CAI Y, HARATSCH E F, MUTLU O, et al. Error patterns in MLC NAND flash memory: measurement, characterization, and analysis [C] // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Dresden, Germany: IEEE, 2012: 521 - 526.
- [14] WU D, YOU H, WANG X, et al. Experimental investigation of threshold voltage temperature effect during cross-temperature write-read operations in 3-D NAND Flash [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2021, 9: 22 - 26.
- [15] LEE K, SHIN H. Investigation of retention characteristics for trap-assisted tunneling mechanism in sub 20nm NAND Flash Memory [J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2017, 17 (4): 758 - 762.
- [16] 孔亚晨. 三维电荷俘获型 NAND 闪存存储器的可靠性研究与优化 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [17] 刘世军. 三维四层单元 NAND 闪存关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [18] JIA X. Impact of cycling induced intercell trapped charge on retention charge loss in 3-D NAND flash memory [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2020, 8: 62 - 66.
- [19] JESD218B.01. Solid-state drive (SSD) requirements and endurance test method [S]. USA: JEDEC Solid State Technology Association, 2016.
- [20] WOO C. Modeling of charge loss mechanisms during the short term retention operation in 3-D NAND flash memories [C] // 2019 Symposium on VLSI Technology, Kyoto, Japan: IEEE, 2019: 214 - 215.
- [21] ZAMBELLI C, MICHELONI R, SCOMMEGNA S, et al. First evidence of temporary read errors in TLC 3D-NAND flash memories exiting from an idle state [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2020, 8: 99 - 104.
- (上接第 205 页)
- [5] REN T, LI Q, YE M, et al. Read disturb and reliability: the complete story for 3D CT NAND flash [C] // 2023 IEEE 12th Non-Volatile Memory Systems and Applications Symposium (NVMSA), Niigata, Japan: IEEE, 2023: 1 - 6.
- [6] ZHANG M. ALCod: adaptive LDPC coding for 3-D NAND flash memory using inter-layer RBER variation [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2023, 69 (4): 1068 - 1081.
- [7] ZHANG G, DENG Y, ZHOU Y, et al. Cocktail: mixing data with different characteristics to reduce read reclaims for NAND flash memory [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2023, 42 (7): 2336 - 2349.
- [8] ZHANG X, MA D, LIN W, et al. Study of a phenomenon of high error WL in mixed read and program operations in 3-D NAND flash [C] // 2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), Xi'an, China: IEEE, 2019: 1 - 3.
- [9] JIA M, KONG Y, ZHAN X, et al. Optimal program-read schemes toward highly reliable open block operations in 3-D charge-trap NAND flash memory [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022, 41 (11): 4797 - 4807.
- [10] PAPANDREOU N. Open block characterization and read voltage calibration of 3D QLC NAND flash [C] // 2020 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Dallas, USA: IEEE, 2020: 1 - 6.
- [11] LI Q, YE M, CUI Y, et al. Resolving the reliability issues of open blocks for 3-D NAND flash: observations and strategies [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2022, 41 (11): 4076 - 4087.
- [12] WEI D. Edge word-line reliability problem in 3-D NAND flash memory: observations, analysis, and solutions [J].