# 基于标量衍射理论的 RIS 波束码本设计



# RIS Code Book Design Based on Scalar Diffraction Theory



摘要:基于傅里叶光学中标量衍射理论,研究了可重构智能超表面(RIS)物理波束调控的码本设计方法,包括波束宽窄、波束指向和波束旋转;同时仿真分析了RIS单元相位比特量化精度对RIS波束方向图的影响。相关方法对实时快速生成RIS波束跟踪对应的RIS码本非常有效。

关键词: RIS; 傅里叶光学; 码本设计; 啁啾函数; 衍射; 角谱

Abstract: Based on the scalar theory of diffraction in Fourier optics, the approach of the code book design for reconfigurable intelligent surface (RIS) is proposed, including designing the width of the beam, and manipulating the direction as well as the rotation of the beam. The influence on the beam pattern is also studied considering the granularity of phase quantization based on simulation. The approach proposed is effective and useful in the fast code book generation for a real-time RIS beam tracking.

Keywords: RIS; Fourier optics; code book design, chirp function; diffraction; angular spectrum

(1)控制等效电路中的等效阻抗,比如通过PIN管(P-I-N结构二极管)/微机电系统(MEMS)开关/变容二极管来控制;

(2)控制材料参数,比如通过外加电场来调节液晶的介电常数(频带可调),或者在基底材料中引入钇铁石榴石,也可以通过磁场来调节基底材料的磁导率等;

(3)机械控制,即通过微机电系统,利用微马达步进电机来控制辐射单元的方向,进而改变辐射相位;

(4) 其他方法,比如光控/光电联合控制等。

目前学术界或工业界 RIS的原型主要以单元的相位调控为 主。这给 RIS单元相位码本增加了恒模的限制。当 RIS的目标波 束是宽波束时,在恒模约束条件下,如何设计合适的码本是一 个关键问题。目前,基于最优化方法进行码本设计是一个研究 方向,比如通过遗传算法、梯度下降法或粒子群算法等。但优 化目标函数的设计、初始值、优化权值配置等对优化结果的性 能影响比较大。在恒模约束限制下,当RIS 面板的规模非常大 时,优化效率不高的问题尤其突出,同时主波束性能也不佳。

本文在傅里叶光学标量衍射基础上<sup>[11]</sup>,讨论了有限啁啾 函数和角谱分析,研究了宽、窄 RIS 波束方向图所对应码本 的设计方法;提出了基于扩展有限啁啾函数码本设计方法, 并针对 RIS空间波束的空域平移、旋转变换提出了相应的高 效码本生成方法;同时分析了不同比特量化粒度对 RIS 波束 性能的影响和远场码本的近场性能对 RIS 辐射方向图的影响。

# 1 有限啁啾函数及其傅里叶变换

在一个有限空域上的二次相位指数函数则被称为有限啁啾函数<sup>[11]</sup>,如公式(1)所示。

$$g(x, y) = \exp\left[j\pi\beta(x^2 + y^2)\right] \cdot rect\left(\frac{x}{2L_x}\right) \cdot rect\left(\frac{y}{2L_y}\right), \quad (1)$$

其中 $\beta$ 为可配置的系数,  $L_x$ 、 $L_y$ 分别为RIS面板长、宽的一半, g(x,y)是RIS面板表面 $[x,y]^T$ 位置处单元的相位。

g(x,y)的傅里叶变换为:  $G(f_x,f_y) = G_x(f_x) \cdot G_y(f_y)$ , 其中:

$$G_{x}\left(f_{x}\right) = \frac{e^{-j\pi\frac{f_{x}}{\beta}}}{\sqrt{2\beta}} \left\{ C\left[\sqrt{2\beta}\left(L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] - C\left[\sqrt{2\beta}\left(-L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] + jS\left[\sqrt{2\beta}\left(L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] - jS\left[\sqrt{2\beta}\left(-L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] \right\}, \quad (2)$$

$$G_{Y}(f_{Y}) = \frac{e^{-j\pi\frac{f_{Y}}{\beta}}}{\sqrt{2\beta}} \left\{ C \left[ \sqrt{2\beta} \left( L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] - C \left[ \sqrt{2\beta} \left( -L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] + jS \left[ \sqrt{2\beta} \left( L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] - jS \left[ \sqrt{2\beta} \left( -L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] \right\}$$

$$(3)$$

C(z), S(z) 为函数的菲涅尔积分, 仿真结果如图1所示。 $C(z) = \int_{0}^{z} \cos\left(\frac{\pi t^{2}}{2}\right) dt, S(z) = \int_{0}^{z} \sin\left(\frac{\pi t^{2}}{2}\right) dt_{o}$ (4)

由于空间频率fx、fy与空间方向余弦之间的关系为[11-12]:

$$\cos(\alpha) = \lambda f_{\chi}, \ \cos(\beta) = \lambda f_{\gamma}, \ \cos(\gamma) = \sqrt{1 - \left[\lambda \left(f_{\chi} + f_{\gamma}\right)\right]^2}_{\circ} (5)$$

因此, 在远场假设基础上, RIS 面板反射波束的辐射方 向图可以通过公式(5)与RIS表面相位分布的角谱直接建 立联系。在一维时域傅里叶变换中, 原函数与其傅里叶变换 表达的是时间域与频率域之间的关系; 而二维空间域傅里叶 变换所表示的是长度域与波数域之间的关系, 其中波数的量



▲图1 C(z)、S(z)菲涅尔积分仿真结果

纲是 1/m。因为:  $k = \frac{p}{\hbar}$ ,其中p是动量,  $\hbar$ 是约化普朗克常数,所以,空间傅里叶变换之后的物理意义就是动量空间,也称为k-space。

仿真例:

对于正方形 RIS 面板,载频 $f_e$  = 28 GHz,横/纵向阵子数 $N_x = N_y = 64$ ,横/纵向阵子间距均为0.5 $\lambda$ ( $\lambda$ 为载频波长)。假设入射波垂直于面板入射,收发端均为远场,根据公式(1)及各阵子单元位置可确定每个阵子的调控相位,通过配置不同 $\beta$ 值可观察其对 RIS 辐射方向图的影响,如图2所示。

由图2可以看出,公式(1)中β值越大,波束的宽度就 会越宽,同时最大增益会越小,但主要波束能量仍然在主波 束范围内。

由于存在 RIS 码本恒模限制,在 RIS 宽波束范围内,其 增益会不可避免地存在一定的抖动。此时,使用半功率波束





#### ▲图2 不同β值对RIS辐射方向图的影响

宽度(HPBW)来定义RIS波束宽度的方法已不再适用,而 定义比最大波束增益低5dB、7dB或9dB的波束宽度则更 为适用,即5dB功率波束宽度(PePBW)、7dB功率波束宽 度(HePBW)、9dB功率波束宽度(NoPBW)。

# 2 扩展有限啁啾函数及可变宽度波束码本

公式(1)中的相位项 $j\pi\beta(x^2 + y^2)$ 仅有一个可调变量 $\beta$ , 其变化会对 RIS 面板波束方向图的横/纵方向产生影响。当需 要在横/纵方向上对波束方向图进行独立调整时,这一相位 项可以扩展为:

$$j\pi\beta(w_{x}\cdot|x|^{n}+w_{y}\cdot|y|^{n})_{o}$$
(6)  
仿真例:

在第1章节的系统仿真条件下, $\beta = 240$ 。我们为系统配置不同的 $n, w_x, w_y$ 。此时的仿真结果如图3所示。

由图3的结果可知,公式(6)的w<sub>x</sub>和w<sub>y</sub>两个参数可以



▲图3 基于扩展有限啁啾函数不同配置参数生成码本对RIS 面板辐射方向图的影响

分别独立控制两个维度的波束宽度,并且w<sub>x</sub>和w<sub>y</sub>的值越大, 波束越宽,增益会越低,但主要波束能量仍然在主波束范 围内。

# 3 波束空间域平移、旋转变换

#### 3.1 波束空间域平移变换

公式(6)中 $j\pi\beta(w_x \cdot |x|^n + w_y \cdot |y|^n)$ 码本所确定的波 束中心在水平角 *AZ*=0°、俯仰角 *EL*=90°的位置。若需要将 波束平移到任意 *AZ*和 *EL*的位置,则相关的码本需要更 新为:

$$j\pi\beta\Big[(w_x\cdot|x|^n+w_y\cdot|y|^n)+2\cdot\big(x\cdot F_x^t+y\cdot F_y^t\big)\Big],\qquad(7-1)$$

$$F_{x}^{t} = -\frac{\cos(\alpha)}{\lambda}, F_{y}^{t} = -\frac{\cos(\beta)}{\lambda},$$
(7-2)

其中,  $\cos(\alpha)$ 与 $\cos(\beta)$ 为目标矢量 V方向余弦的前两项。

$$\boldsymbol{V}^{t} = \left[\cos(EL)\cos(AZ - \pi), \ \cos(EL)\sin(AZ - \pi), \ \sin(EL)\right]_{\circ}^{T}$$
(7-3)

在第1章节的系统仿真条件下,我们以AZ=0°、EL= 90°为基础进行平移仿真实验。仿真实验结果如图4 所示。

由图4的结果可知,基于公式(7-1)—(7-3)的方法 可以灵活控制波束的平移变换位置。

#### 3.2 波束空间域旋转变换

理论上,基于恒模码本进行旋转变换是无解析解的。由 基于空间频域旋转变换的逆傅里叶变换推导可知,其首项为 空间域的旋转变换。因此,当在空间频域进行θ旋转时,可 以考虑如下码本策略:

$$j\pi\beta \Big[ \left( w_x \cdot \left| x^{\text{Trans}} \right|^n + w_y \cdot \left| y^{\text{Trans}} \right|^n \right) \Big], \tag{8-1}$$

$$\underbrace{\mathbf{x}^{\mathrm{Trans}}}_{\text{$\xi$tem}} = \mathbf{R}_{\mathrm{rot}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\mathrm{rot}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}_{\mathrm{o}}$$
(8-2)

在第1章节的系统仿真条件下,以旋转角*θ*=0°为基础进 行旋转的仿真实验结果如图(5)所示。

由图5可知,基于公式(8-1)—(8-2)的方法可以灵 活控制波束的旋转方向。由于恒模码本无旋转变换无解析 解,旋转后的波束会有一定程度的变形,但尚在可接受范 围内。





#### 3.3 波束空间域平移旋转复合变换

考虑综合的空间域平移旋转复合变换相位为:

$$j\pi\beta\Big[(w_x\cdot |x^{\text{Trans}}|^n + w_y\cdot |y^{\text{Trans}}|^n) + 2\cdot (x^{\text{Trans}}\cdot F_x^t + y^{\text{Trans}}\cdot F_y^t)\Big],$$
(9-1)

$$F_{x}^{t} = -\frac{\cos(\alpha)}{\lambda}, F_{y}^{t} = -\frac{\cos(\beta)}{\lambda}, \qquad (9-2)$$

其中, $\cos(\alpha)$ 与 $\cos(\beta)$ 分别为目标波束方向中矢量V方向余弦的前两项。

$$V^{t} = \left[\cos(EL)\cos(AZ - \pi), \cos(EL)\sin(AZ - \pi), \sin(EL)\right]^{\mathrm{T}},$$
(9-3)

$$\begin{bmatrix} x^{\text{Trans}} \\ y^{\text{Trans}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{rot}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (9-4)$$

其中, AZ和EL为波束平移的位置, θ为空间频域旋转角度。



以  $AZ=0^{\circ}$ 、 $EL=90^{\circ}$ 、旋转角  $\theta=0^{\circ}$ 为基础进行旋转的仿 真实验结果如图(6)所示。

可以看出,图6的仿真结果证明了通过公式(9-1)— (9-4)进行波束联合平移和旋转变换的可行性。

# 4 不同比特量化粒度对性能的影响

考虑到RIS工程实现对相位调整粒度的限制,我们需要研究不同比特量化下的波束性能。*N* bit 对应的可选离散相位如下:

$$\begin{bmatrix} \phi_0 & \phi_1 & \phi_2 & \cdots & \phi_{2^{n-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2\pi}{2^n} \cdot 1 & \frac{2\pi}{2^n} \cdot 2 & \cdots & \frac{2\pi}{2^n} \cdot 2^{n-1} \end{bmatrix}_{\circ}$$
(10)

基于最邻近原则,由公式 (1)、(6) — (9) 确定的RIS 第 (m,n) 个单元的连续相位为 $\vartheta_{m,n}$ 。在此基础上,可通过公 式 (10) 确定RIS第(m,n)个单元所对应的离散码本相位 $\varphi_{m,n}$ 。

$$\varphi_{m,n} = \phi_k, \tag{11}$$





 $\begin{vmatrix} \phi_k - \vartheta_{m,n} \end{vmatrix} = \min \left( \begin{vmatrix} \phi_0 - \vartheta_{m,n} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \phi_1 - \vartheta_{m,n} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \phi_2 - \vartheta_{m,n} \end{vmatrix}, \quad \dots, \quad \begin{vmatrix} \phi_{2^{n-1}} - \vartheta_{m,n} \end{vmatrix} \right)_{n}$ (12)

在第1章节的系统仿真条件下,不同比特量化对RIS波 束方向图的影响如图7—9所示。

根据图8—9的仿真结果,我们可以得出以下3个结论:

(1) 比特量化对RIS辐射方向图的影响较大:一方面主 瓣波束的波动会变大,另一方面会激励出较大的旁瓣;

(2) 4 bit 及以上量化精度与连续相位的结果已经非常接近,可以用于静态面板的设计;

(3) 1 bit 量化精度在主瓣方向波束有较明显的分叉现 象,宽波束性能不理想。

### 5 远场码本在近场的性能表现

在第1章节的系统仿真条件下,假设 $\beta = 1$ ,入射激励仍然为远场,RIS面板中心与接收点之间的距离为 $d_2$ 。当采用远场波束码本时( $d_2$ 满足Fraunhofer条件), $d_2$ 近场RIS波





▲图8 不同比特量化的智能超表面(RIS)波束方向图顶视图



▲图9 不同比特量化的智能超表面(RIS)波束横向剖面图比较(0°剖面)

束的性能分析结果(横向剖面图)如图10所示。

由图10可以看出:

(1)远场码本在远场的辐射方向图与 d<sub>2</sub>=1 000 m处的辐射方向图基本重合;

(2) 当 d<sub>2</sub>减小时,波束出现明显展宽效应,最高增益 变小。

## 6 结论

本文在傅里叶光学标量衍射基础上,研究了宽/窄 RIS波 束方向图、RIS空间波束的空域平移与旋转变换所对应码本 的高效生成方法,并仿真分析了不同比特量化粒度对 RIS波 束性能的影响和远场码本的近场性能对 RIS辐射方向图的影 响。相对于基于优化的码本设计方法,本文给出的方法性能 好、效率高,尤其适用于实时 RIS 波束跟踪等场景的应用, 同时给出了如下的结果和建议:



▲图10 远场码本在近场的性能仿真

(1)用HPBW定义RIS波束宽度已不合适,而定义比最 大波束增益低5dB、7dB或9dB的波束宽度则更为适用, 即5dB功率波束宽度(PePBW)、7dB功率波束宽度 (HePBW)、9dB功率波束宽度(NoPBW)。

(2) 基础有限啁啾函数码本设计方案为 $[j\pi\beta(x^2 + y^2)]$ 。 其中, $\beta$ 为可调参数,该值越大,波束越宽。

(3) 扩展有限啁啾函数码本设计方案为 $j\pi\beta(w_x \cdot |x|^n + w_y \cdot |y|^n)$ 。 $w_x \pi w_y$ 可以控制波束在不同刨切面的宽度。n为 另外一个控制波束宽窄的参数,可以与 $\beta$ 联合优化。

(4)综合的空间域平移旋转复合变换相位满足 3.3 章节所示的(9-1)—(9-4)。

(5) 不同比特量化对 RIS 波束辐射方向图性能的影响如下:

a. 比特量化对 RIS 辐射方向图的影响较大:一方面主瓣 波束的波动会变大,另一方面会激励出较大的旁瓣;

b.4 bit 及以上量化精度与连续相位的结果已经非常接近,可以用于静态面板的设计;

c.1 bit量化精度在主瓣方向波束有较明显的分叉现象, 宽波束性能不理想。

(6) 当采用远场窄波束码本时,近场 RIS 波束的性能为:

a. 远场码本在远场的辐射方向图与 d<sub>2</sub>=1 000 m处的辐射 方向图基本重合;

b. 当d,减小时, 波束出现明显展宽效应, 最高增益下降。

#### 致谢

本研究得到西安电子科技大学秦凡副教授,中兴通讯股

份有限公司袁志峰、杨军、陈艺戬、俞光华等专家的帮助,谨致 谢意!

#### 参考文献

- [1] 窦建武, 陈艺戬, 张楠, 等. 智能可控电磁表面信道建模 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 368-377. DOI: 10.12265/i.cjors.2020195
- [2] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天线 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 256-265. DOI: 10.13443/j.cjors.2018052401
- [3] WU R Y, CUI T J. Microwave metamaterials: from exotic physics to novel information systems [J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2020, 21(1): 4–26. DOI: 10.1631/fitee.1900465
- [4] HUM S V, PERRUISSEAU-CARRIER J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(1): 183–198. DOI: 10.1109/TAP.2013.2287296
- [5] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter [J]. Electronics letters, 2019, 55 (7): 417-420. DOI: 10.1049/el.2019.0400
- [6] CHEN K, FENG Y J, MONTICONE F, et al. A reconfigurable active Huygens' metalens [J]. Advanced materials, 2017, 29(17): 1606422. DOI: 10.1002/ adma.201606422
- [7] 杨帆, 许慎恒, 毛艺霖, 一种基于数字相控电磁表面的新型相控阵: CN106848588B [P]. 2017
- [8] 蒋卫祥, 张信歌, 柏林, 等. 一种基于数字编码表征的方向图可重构平面阵列天 线及其控制方法: CN110148838A [P]. 2019
- [9] KAMODA H, IWASAKI T, TSUMOCHI J, et al. 60–GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(7): 2524–2531. DOI: 10.1109/TAP.2011.2152338
- [10] 许河秀. 超表面电磁调控机理与功能器件应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019
- [11] GOODMAN J W. Introduction of Fourier optics: third edition [M]. London: Publishing House of Electronics Industry, 2016
- [12] 苏显渝. 信息光学: 第2版 [M]. 北京: 科学出版社, 2011

#### 作者简介



**崔亦军**,中兴通讯股份有限公司无线移动新型基 站架构总工、深圳市高层次国家级领军人才;主 要研究方向为 5G/6G 无线产品架构、超宽带基 站、Massive MIMO、智能电磁表面等;主持开 发的 Pre5G Massive MIMO荣获巴塞展全球移动 大奖"最佳移动技术突破奖"和"CTO选择奖", 参与和主持国家重大科技专项多项;获河南省科 技进步奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等

奖等奖项;申请专利30余项。



窦建武,中兴通讯股份有限公司正高级工程师、 中国电子学会电波传播分会委员、IMT-2030信 道测量与建模组副组长、移动专用网络国家工程 研究中心专用移动通信研究所所长、深圳市高层 次国家级领军人才;主要研究方向为5G/6G无线 信道建模、无人机通信、卫星通信、太赫兹通信、 Massive MIMO、智能电磁表面等;参与3GPP 5GCM/UAV/NTN等标准化工作,所主导的Map-

based Hybrid 信道模型被3GPP及ITU 国际标准化组织采纳,参与和主持国家重大科技专项多项;获中国专利金奖、上海市科技进步奖、中国通信学会科技技术奖一等奖等奖项。



**刘怡平**,西安电子科技大学广州研究院在读硕士 研究生;主要研究方向为5G/6G信道建模、智能 电磁表面、超材料天线等。