

## 多子阵平板天线波束指向频率响应分析与固定长度延迟线应用

林志强<sup>\*①</sup> 秦丽平<sup>②</sup> 姚敏立<sup>①</sup> 沈晓卫<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(第二炮兵工程学院602教研室 西安 710025)

<sup>②</sup>(解放军96301部队)

**摘要:** 天线高度是宽带卫星移动通信系统推广应用的一个重要制约因素,采用多子阵技术可以降低平板天线的天线高度。然而多子阵平板天线阵的离散口径会造成天线波束指向频率响应的恶化。为改善天线波束指向频率响应,该文采用固定长度延迟线与移相器相结合的两级馈相方法,提出了一种基于多套延迟线的切换波束技术,将天线波束的扫描范围划分为多个区域,各区域采用不同的延迟线以合成相应的波束。仿真结果表明,该方法可以有效减小天线波束指向漂移,满足卫星移动通信系统对天线波束指向精度的要求。

**关键词:** 多子阵平板天线; 卫星移动通信; 延迟线; 波束指向频率响应; 移相器

**中图分类号:** TN812; TN820.1+5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2011)-04-0987-05

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2010.00794

## Beam Pointing Excursion Versus Frequency and Application of Fixed Delay Line for the Planar Antenna with Multiple Subarrays

Lin Zhi-qiang<sup>①</sup> Qin Li-ping<sup>②</sup> Yao Min-li<sup>①</sup> Shen Xiao-wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Staff Room 602, The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

<sup>②</sup>(PLA 96301 Unit)

**Abstract:** As the application of SATCOM On-The-Move (SOTM) is restricted by the height of antenna, the planar antenna with multiple subarrays is adopted to reduce the height of antenna. However, the excursion of beam pointing versus frequency is deteriorated because of its dispersed aperture. In order to reduce the excursion of beam pointing, the feeder system using fixed delay line and phase shifter is applied in this paper, and the switching-beam technique based on multi-set fixed delay lines is proposed. The proposed method divides the antenna scanning range into several small ones, and uses different fixed delay lines in each range. Simulation results show that the method can reduce the excursion of beam pointing effectively, and the requirement of beam pointing accuracy for SOTM can be satisfied.

**Key words:** The planar antenna with multiple subarrays; Mobile satellite communication; Delay line; Beam pointing excursion versus frequency; Phase shifter

### 1 引言

宽带卫星移动通信是指基于固定卫星通信频段的移动通信技术,国内俗称“动中通”,随着卫星通信技术的迅猛发展,动中通卫星通信系统已成为一种移动通信的良好手段,在突发公共事件处理、应急指挥、最新消息实时传递等领域中发挥着非常重要的作用。同时随着人们对生活品质要求的提高,在火车、飞机、汽车、轮船等高速运动的载体上安装轻便、灵活的动中通系统,实时收看卫星电视节目、实现卫星高速上网等,已成为人们生活的新需求。然而,由于传统动中通系统的天线高度较高,

受到空气阻力、涵洞高度等因素的限制<sup>[1]</sup>,有的系统在火车上做实验还要在火车顶上挖洞或开槽,改动火车结构,这就使得系统的推广应用受到很大的限制。天线的高度问题已经成为动中通系统推广的一个重要制约因素。

动中通按其所采用的天线类型大体可分为两类:抛物面天线动中通和平板天线动中通。抛物面天线动中通一般采用空间馈电方式,其体积较大,高度难以降低;而平板天线动中通一般采用强制馈电方式,这使得其在降低天线高度上有更多的灵活性。早在上个世纪八十年代,日本NHK公司就已经研制出了第一款平板天线动中通系统,但当时天线高度达35 cm<sup>[2]</sup>,然而由于平板天线在降低天线高度上的潜在优势,加之动中通系统从最初的军用向民

2010-07-28 收到, 2010-11-24 改回

\*通信作者: 林志强 linzq602@sohu.com

用的转变,使得对动中通的研究热点从抛物面天线动中通转向了平板天线动中通<sup>[1,3,4]</sup>。目前国外从事平板天线动中通的研究单位很多,也研发出诸如SpeedRay 1000, HiSat, TracVision A5之类的用于车载移动通信的低轮廓平板天线动中通,这些动中通的天线高度均小于15 cm,有的已经开始进入中国市场<sup>[3-5]</sup>。然而,由于技术封锁等方面的原因,国内自主研发的动中通系统大多还是抛物面天线动中通,对平板天线动中通的研究还处于起步阶段,而低轮廓平板天线动中通则仍未有样机的相关报告。

多子阵技术是平板天线动中通降低天线高度的一种主要方法,然而多子阵平板天线阵的离散口径带来了两大问题:一是天线的方向图性能变差,且难以通过幅相加权得以优化;二是天线的孔径渡越时间增大,使得其瞬时信号带宽较小<sup>[6]</sup>。对于Ku频段动中通,其接收频率范围为12.25-12.75 GHz,卫星的信标信号一般在接收频率范围的两端,而卫星天线转发器的带宽一般为36 MHz,为了有效地进行通信内容与跟踪信号的接收,文献[7]采用两套移相器以产生两个波束,其中主波束用于通信内容的接收,跟踪波束用于接收信标信号,然而此时馈线系统结构复杂、造价较高。为改善天线波束的指向频率响应,一般采用实时延迟器替代移相器实现天线波束扫描<sup>[8-11]</sup>,但实时延迟器同样存在成本较高、可靠性较差等问题。因此,本文采用固定长度延迟线加移相器的两级馈相技术,并提出一种基于多套延迟线的切换波束技术,以进一步改善天线波束指向频率响应。

## 2 多子阵平板天线阵

多子阵技术,即把原来整个大的平板天线分成几个较小的天线阵,减小天线板宽度,分板后的天线称为多子阵天线阵。这种将较大平板天线“切割”成较小天线阵的技术可以有效降低天线的高度。如果把平板天线分成 $Q$ 个子阵,则天线的高度降为原来 $Q$ 分之一<sup>[6]</sup>。

图1为多子阵平板天线阵的结构示意图, $Q$ 为子阵个数, $q=1,2,\dots,Q$ 为子阵的序号,所有的天线子阵均放置于转台之上, $d_i(i=1,2,\dots,Q-1)$ 为子阵间距,平板天线的波束方向为其法线,若天线对准卫星,则图中 $\alpha$ 称为对星仰角,为提高天线的瞬时信号带宽,图中采用了固定长度延迟线与移相器相结合的两级馈相方法。在载体运动过程中,方位电机驱动转台以实现方位对准,俯仰对准则由各子阵后的俯仰电机和移相网络实现,这样就能实现实时高速通信。

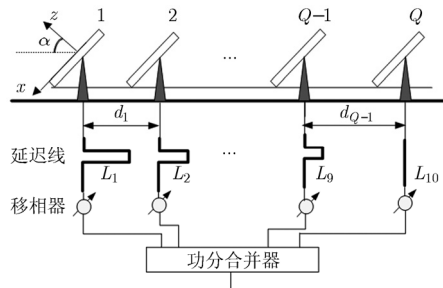


图1 多子阵平板天线阵

建立如图2所示的阵面坐标系 $o-xyz$ ,该坐标系与子阵固连: $x$ 轴沿子阵宽方向; $y$ 轴沿子阵长方向,与转台平面平行; $z$ 轴垂直于子阵板平面,与 $x,y$ 轴构成直角坐标系。

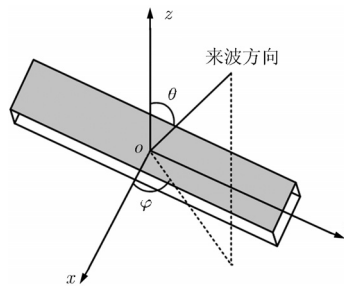


图2 子阵阵面坐标系

由方向图乘法原理可知,子阵的天线方向图函数可表示为

$$f(\theta, \varphi) = e(\theta, \varphi) \left[ \sum_{n=1}^N a_n \exp(jkndx \sin \theta \cos \varphi) \right] \cdot \left[ \sum_{m=1}^M b_m \exp(jkmdy \sin \theta \sin \varphi) \right] \quad (1)$$

其中 $dx$ 和 $dy$ 分别为子阵 $x$ 方向和 $y$ 方向天线单元间距, $k=2\pi/\lambda$ 为来波信号的自由空间波数, $N,M$ 分别为子阵板宽和板长方向的天线单元数, $e(\theta, \varphi)$ 为天线单元方向图, $a_n(n=1,\dots,N)$ , $b_m(m=1,\dots,M)$ 分别为子阵在宽和长方向的幅度加权。多子阵平板天线阵的方向图由各子阵的天线方向图合成得到,卫星信号在子阵之间形成的空间相位差由馈电网络进行补偿。

子阵之间的空间相位差与来波方向和对星仰角 $\alpha$ 有关,通过几何关系计算可知,第 $q$ 子阵和第 $Q$ 子阵间的空间相位差为

$$\phi_q(\theta, \varphi, \alpha) = k(\sin \alpha \sin \theta \cos \varphi + \cos \alpha \cos \theta) \cdot \sum_{i=q}^{Q-1} d_i, \quad q=1,2,\dots,Q-1 \quad (2)$$

当多子阵平板天线阵对准卫星时,第 $q$ 子阵与第

$Q$ 子阵接收到的卫星信号的空间相位差为 $\phi_q(0,0,\alpha)$ , 这一相位差由馈相网络进行补偿, 即

$$\Phi_q = \phi_q(0,0,\alpha) = k \cos \alpha \cdot \sum_{i=q}^{Q-1} d_i, \quad q = 1, 2, \dots, Q-1 \quad (3)$$

对各子阵天线接收的信号进行合成, 假设各子阵的天线方向图函数是相同的, 则多子阵平板天线阵的方向图可表示为

$$F(\theta, \varphi, \alpha) = f(\theta, \varphi) \left\{ \sum_{q=1}^{Q-1} c_q \exp(j(\Phi_q - \phi_q(\theta, \varphi, \alpha))) + c_Q \right\} \quad (4)$$

其中 $c_q$ 为第 $q$ 子阵的幅度加权,  $\sum_{q=1}^{Q-1} c_q \exp(j(\Phi_q - \phi_q(\theta, \varphi, \alpha))) + c_Q$ 为阵因子方向图, 而 $F(\theta, 0, \alpha)$ 则为天线在俯仰维的方向图。多子阵平板天线阵的方位维的天线方向图与单板天线相同, 而移相网络仅补偿俯仰维上的相位差, 因此, 本文仅对其俯仰维的天线波束指向频率响应进行分析。

### 3 多子阵平板天线阵天线波束指向漂移

由于子阵方向图的波束指向为子阵的法线, 不存在随频率变化而带来的指向漂移, 由式(4)可知, 此时天线波束的指向漂移将略小于阵因子的波束指向漂移。下面将对仅用移相器进行相位补偿时的阵因子方向图指向频率响应进行分析。

假设多子阵平板天线阵的子阵间距相等, 即令 $d_i = D (i = 1, 2, \dots, Q-1)$ , 当对星仰角为 $\alpha_0$ 时, 此时第1子阵比第 $Q$ 子阵有最大的超前时间 $T_0$

$$T_0 = \frac{(Q-1)D \cos \alpha_0}{c} \quad (5)$$

式中 $c$ 为自由空间光速。 $T_0$ 也称为天线的孔径渡越时间, 表示多子阵平板天线阵对远区目标有着频率的色散<sup>[9]</sup>, 且这种色散随着对星仰角 $\alpha$ 的减小而恶化。

设 $f_0$ 为信号的中心频率, 则卫星方向的中心频率信号在相邻子阵间产生的空间相位差为

$$\phi(f_0, \alpha_0) = \frac{2\pi f_0}{c} D \cos \alpha_0 \quad (6)$$

这一空间相位差由移相器进行补偿。当信号频率由 $f_0$ 变为 $f_1 = f_0 + \Delta f$ 时, 由于移相器提供的移相值原则上不随频率而变, 考虑到与上述两个频率相应的阵内相位差和空间相位差的平衡, 可以得到工作频率为 $f_1$ 时, 新的阵因子方向图波束指向角 $\alpha_1$ 应满足

$$\phi(f_0, \alpha_0) = \phi(f_1, \alpha_1) \quad (7)$$

即

$$\frac{2\pi f_0}{c} D \cos \alpha_0 = \frac{2\pi f_1}{c} D \cos \alpha_1 \quad (8)$$

当频率变化 $\Delta f$ 相对 $f_0$ 很小时, 指向偏差角 $\Delta\alpha$ 很

小, 于是有

$$\cos \alpha_1 = \cos(\alpha + \Delta\alpha) \approx \cos \alpha - \Delta\alpha \sin \alpha \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可得

$$\Delta\alpha(\alpha_0) = \frac{f_1 - f_0}{f_1 \tan \alpha_0} \quad (10)$$

此时天线阵因子的波束指向漂移随对星仰角 $\alpha$ 的增大而减小。

## 4 固定长度延迟线对天线波束指向漂移的改善

### 4.1 采用单套延迟线时的天线波束指向漂移

为改善天线波束指向频率响应, 本文采用如图1所示的两级相位补偿机制, 即通过固定长度延迟线和移相器来进行天线波束指向的调整。当多子阵平板天线阵的子阵间距相等, 即 $d_i = D (i = 1, 2, \dots, Q-1)$ 时, 可以认为理想的延迟线长度应呈等差数列, 即 $L_i - L_{i+1} = \Delta L (i = 1, 2, \dots, Q-1)$ , 当对星仰角为 $\alpha$ 时, 此时天线的孔径渡越时间为

$$T_0 = \frac{(Q-1) \left[ D \cos \alpha_0 - \Delta L \sqrt{\epsilon_r} \right]}{c} \quad (11)$$

式中 $\epsilon_r$ 为延迟线的相对介电常数。

此时相邻子阵的延迟线长度差 $\Delta L$ 所补偿的子阵相位差为

$$\Delta\phi_{\text{线}} = \frac{2\pi f_0}{c} \Delta L \sqrt{\epsilon_r} = \frac{2\pi f_0}{c} D \cos \beta \quad (12)$$

$\beta$ 表示当相邻子阵的移相差为零时, 长度差为 $\Delta L$ 延迟线组正好使阵因子方向图的波束指向仰角 $\beta$ 处, 于是移相器提供的相邻子阵的移相差为

$$\Delta\phi_{\text{移}} = \frac{2\pi f_0}{c} D \cos \alpha_0 - \Delta\phi_{\text{线}} \quad (13)$$

当频率由 $f_0$ 变为 $f_1$ 时, 由“阵间相位差”和“空间相位差”的平衡, 天线阵因子的指向角 $\alpha_1$ 满足

$$\begin{aligned} \frac{2\pi f_0}{c} D \cos \alpha_0 - \frac{2\pi f_0}{c} D \cos \beta \\ = \frac{2\pi f_1}{c} D \cos \alpha_1 - \frac{2\pi f_1}{c} D \cos \beta \end{aligned} \quad (14)$$

由式(9), 式(14)可得

$$\Delta\alpha(\alpha_0) = \frac{(f_1 - f_0)(\cos \alpha_0 - \cos \beta)}{f_1 \sin \alpha_0} \quad (15)$$

为了使波束在扫描范围内的最大指向漂移达到最小, 设天线的仰角扫描范围为 $\alpha = [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ , 则天线的最大指向漂移发生在仰角 $\alpha_{\min}$ 或 $\alpha_{\max}$ 处, 令 $\Delta\alpha(\alpha_{\min}) = -\Delta\alpha(\alpha_{\max})$ , 即

$$\frac{\cos \alpha_{\min} - \cos \beta}{\sin \alpha_{\min}} = -\frac{\cos \alpha_{\max} - \cos \beta}{\sin \alpha_{\max}} \quad (16)$$

令 $\alpha_{\min} = 20^\circ$ ,  $\alpha_{\max} = 70^\circ$ , 求解可得,  $\beta = 38.72^\circ$ , 即延迟线长度差 $\Delta L$ 正好补偿对星仰角为 $\alpha = 38.72^\circ$ 时子阵间产生的卫星信号相位差

$$\Delta L = \frac{D \cos \beta}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (17)$$

现对固定长度延迟线对天线波束指向漂移的改善效果进行仿真。仿真条件： $e(\theta, \varphi) = 1$ ， $N = 4$ ， $a_n = 1$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ )， $Q = 8$ ， $c_q = 1$  ( $q = 1, 2, \dots, Q$ )， $dx = 12 \text{ mm}$ ， $\alpha_{\min} = 20^\circ$ ， $\alpha_{\max} = 70^\circ$ ， $d_i = 85.7 \text{ mm}$  ( $i = 1, 2, \dots, 7$ )， $f_0 = 12.5 \text{ GHz}$ ， $f_1 = 12.75 \text{ GHz}$ 。

图3为增加延迟线前后的天线波束指向漂移随仰角的变化曲线，图中的两级馈相中所采用的子阵延迟线长度差如式(17)。从图中可以看出，仅移相器馈相时的最大天线波束指向漂移为 $2.80^\circ$ ，而加入一套固定长度延迟线后，最大天线波束指向漂移降为 $0.52^\circ$ 。

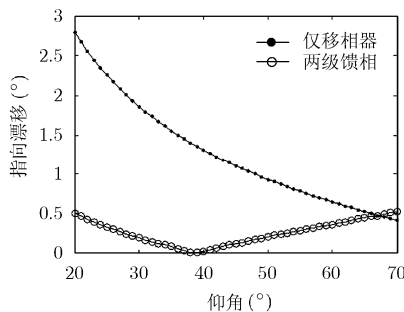


图3 固定长度延迟线对天线波束指向漂移的改善

### 4.2 基于多套延迟线的切换波束技术

为进一步改善多子阵平板天线阵的天线波束指向频率响应，可采用多套固定长度延迟线进行较精细的时延补偿，将天线的俯仰扫描范围划分为多个区域，每个区域采用一套延迟线以合成对应的波束。如图4所示， $S_1, S_2, \dots, S_p$ 表示将扫描范围划分为 $p$ 个区域，当卫星位于 $S_p$ 区域时，馈线系统自动切换使用第 $p$ 套延迟线以合成天线波束，此称为切换波束技术。

为分析切换波束技术对天线波束指向漂移的改善效果，图5给出了切换波束技术与采用4位实时

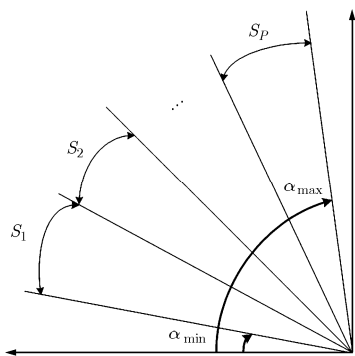


图4 切换波束示意图

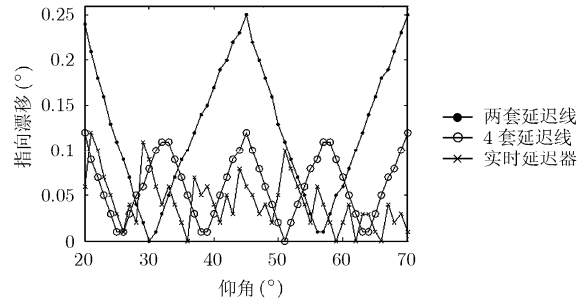


图5 固定长度延迟线与实时延迟器的天线波束指向漂移

延迟器时的天线波束指向漂移对比曲线，其中实时延迟器的最小延迟量为 $\Delta\tau = 2c/\lambda_0 = 0.163 \text{ ns}$ 。图中的两套延迟线是指将天线的扫描范围平均划分为两个区域，其中 $S_1 = [20^\circ, 45^\circ]$ ， $S_2 = [45^\circ, 70^\circ]$ ，并结合式(16)得出各区域中所采用的延迟线长度，即相邻子阵延迟线长度差分别为 $\Delta L_1 = D \cos \beta_1 / \sqrt{\epsilon_r}$ ， $\Delta L_2 = D \cos \beta_2 / \sqrt{\epsilon_r}$ ，其中 $\beta_1 = 30.24^\circ$ ， $\beta_2 = 56.61^\circ$ 。4套延迟线的处理方法与此相同，这里就不再赘述。从图5可以看出，在采用两套延迟线时，最大天线波束指向漂移为 $0.25^\circ$ ，采用4套延迟线与4位实时延迟器的最大天线波束指向漂移同为 $0.12^\circ$ 。结合图3可知，每增加一倍的延迟线套数，即切换波束技术中的分区个数每增加一倍，则最大天线波束指向漂移就会相应的减小一半，且最大天线波束指向漂移总是出现在天线俯仰扫描范围分区的两端。由于此多子阵平板天线阵的俯仰波束主瓣宽度为 $4^\circ$ 左右，而一般的跟踪精度为 $1/10$ 的半波束宽度，显然采用两套延迟线就能满足天线波束指向漂移小于跟踪精度的要求。

多子阵平板天线阵中各子阵所用的延迟线个数也可以是不同的，由于阵列中心的子阵在俯仰扫描时的波程差较小，因此其对切换波束技术中的分区个数需求较少。在工程实践中，为减少延迟线与开关的个数，可将阵列中心的子阵所用的延迟线个数减少，使得不同位置的子阵所用的延迟线个数呈自阵列边缘向中心渐降势态，这样就能用较少的延迟线获得较好的天线波束指向频率响应。

### 5 结论

多子阵技术是平板天线动中通降低天线系统高度的一个重要方法，然而多子阵平板天线阵的离散口径却会造成天线孔径渡越时间的增加，从而影响了天线波束的指向频率响应。为在控制天线系统造价的同时改善天线波束指向频率响应，本文采用了固定长度延迟线与移相器相结合的两级馈相方法，并提出了一种基于多套延迟线的切换波束技术，仿

真结果表明该方法能有效地减小天线波束指向漂移, 能够满足动中通系统对天线波束指向精度的要求。

### 参 考 文 献

- [1] Shelley M, Pearson R, and Vazquez J. Low profile, dual-polarised antenna for aeronautical and land mobile satcom [C]. ASMS 2008. 4th Advanced Satellite Mobile Systems Conference, Bologna, Italy, Aug. 2008: 16-19.
- [2] Ito Y and Yamazaki S. A mobile 12 GHz DBS television receiving system [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 1989, 35(1): 56-62.
- [3] Vaccaro S, Tiezzi F, and Llorens D, *et al.* Ku-band low profile antennas for mobile satcom [C]. ASMS 2008. 4th Advanced Satellite Mobile Systems Conference, Bologna, Italy, Aug. 2008: 24-28.
- [4] RaySat, Inc. SpeedRay™ 1000 Installation & User Guide [Z]. Virginia, US, 2006: 14-17.
- [5] Mousavi P, Fakharzadeh M, and Jamali S H, *et al.* A low-cost ultra low profile phased array system for mobile satellite reception using zero-knowledge beamforming algorithm [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(12): 3667-3679.
- [6] 王琼. 低轮廓平板天线动中通的天馈系统设计及其优化研究 [D]. [博士学位论文], 第二炮兵工程学院, 2009.  
Wang Qiong. Antenna feeding design and optimization technique of low-profile panel antenna for satcom on the move [D]. [Ph.D. dissertation], The Second Artillery Engineering Institute, 2009.
- [7] Son S H, Yun J S, and Park U H, *et al.* Theoretical analysis for beam pointing accuracy of stair-planar phased array antenna with tracking beam [C]. IEEE proc. of Antennas and Propagation Symposium, Columbus, Ohio, USA, Jun. 2003, 4: 204-207.
- [8] Kong De-wu and Zhang Chuan-fang. X-band optically controlled phased array antenna demonstration [C]. 2009 IET International Radar Conference, Guilin, China, April. 2009: 1-3.
- [9] 卫健, 束咸荣, 李建新. 宽带相控阵天线波束指向频响分析和实时延迟器应用[J]. *微波学报*, 2006, 22(1): 23-26.  
Wei Jian, Shu Xian-rong, and Li Jian-xin. Beam-pointing excursion versus frequency and application of realtime delayers for the wideband phased array [J]. *Journal of Microwaves*, 2006, 22(1): 23-26.
- [10] Wei Wen, Li Ning, and Tang Jun, *et al.* Broadband digital beamforming based on fractional delay in SAR systems [C]. APSAR 2009. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xian, China, Oct. 2009: 575-578.
- [11] Chen Chang-ming, Yi Yun-ji, and Wang Fei, *et al.* Ultra-long compact optical polymeric array waveguide true-time-delay line devices [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 754-761.
- 林志强: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为阵列天线、无线通信等.
- 秦丽平: 女, 1982年生, 硕士, 研究方向为阵列天线优化设计等.
- 姚敏立: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、智能天线、移动卫星通信等.
- 沈晓卫: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为阵列天线、传感器融合等.