

文章编号: 1001-2486(2011)01-0095-05

卫星导航系统中平台运动对天线阵列性能的影响分析*

曾祥华, 李敏, 聂俊伟, 王飞雪

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 常规的天线阵自适应算法侧重于研究稳态条件下的最优性能。当卫星导航接收机应用于运动载体(如炸弹、飞机、机动车辆、舰艇)时,阵列平台的运动(或振动)将会导致权值“零陷”指向与干扰来向失配。建立了运动条件下的阵列信号模型,将平台运动分为第一类平台运动(高频振动)和第二类平台运动(平稳转动),给出了两类运动模型下阵列输出信干噪比的理论计算公式。仿真分析结果表明,阵列输出信干噪比对角度扰动比较敏感,而干扰强度影响较小,这是因为天线阵容易形成窄而深的零陷。对于卫星导航接收机常用的7元中心圆阵,当角度扰动为 3° 时,信干噪比损耗达到3.3dB。提高权值更新速率和扩展零陷宽度是增强抗干扰天线阵稳健性的有效手段。

关键词: 卫星导航系统; 抗干扰; 天线阵; 平台运动; 零陷

中图分类号: TN821.91 **文献标识码:** A

Effects of Motion on Adaptive Array in Satellite Navigation Systems

ZENG Xiang-hua, LI Min, NIE Jun-wei, WANG Fei-xue

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Adaptive algorithms of antenna arrays usually focus on the optimal performance under stable conditions. If GNSS receivers are mounted on moving subjects (such as bombards, aircrafts, vehicles or ships), the movement or turbulence of the platform can make the "null" direction mismatch the interferer direction. The current research is paper firstly established an array signal model under platform motion, which was classified into two types: the first motion type (high-frequency turbulence) and the second motion type (stable tilting). Then it developed the analytic formula of array output Signal-to-Interference-plus-Noise ratio (SINR) under two types of motion models. Simulation results show that the array output SINR is more sensitive to the arriving angle of the interferer than to its power, which is because the antenna usually forms narrow and deep nulls. For a 7-element antenna array with one element at center and other elements in a circle around the center, when the arriving angle of the interferer changes by 3 degrees, the loss of SINR reaches 3.3 dB. Improving weight updating rates and widening the null width are both effective means in improving the robustness of the anti-jamming antenna arrays.

Key words: satellite navigation systems; anti-jammer; antenna array; moving platform; null

自适应天线阵广泛应用于雷达、通信、导航等领域,可根据信号的空间特征区分信号,能有效抑制与有用信号方向不同的各种有意或无意干扰,而对于干扰信号的类型和样式不敏感^[1]。针对阵列抗干扰问题,各类算法应运而生,如LMS算法^[2]、RLS算法^[3]和SMI^[6]算法等,其本质上均是求出或逼近最优权值、最大信干噪比准则下的最优权值与干扰导向矢量张成的空间正交^[4]。通常的天线阵自适应算法侧重于研究静态环境下的最优性能^[5]。随着抗干扰型卫星导航接收机在炸弹、飞机、机动车辆、舰艇的应用,运动条件下自适

应天线阵的稳健性也逐渐受到关注^[7-8]。当干扰和阵列平台(载体)发生相对运动时,静态环境下的结论通常会发生变化。

零陷指向误差是指阵列形成的“零陷”与干扰来向不一致,不能准确地对消干扰,从而导致抗干扰性能下降。其产生原因主要包括:一是阵列平台运动(振动)导致零陷总是出现随机的指向误差;二是干扰源和阵列平台存在相对运动,即干扰入射角是时变的,而阵列权值的计算和更新采用批处理方式,权值的应用总是滞后于训练数据一段时间,当权值更新速度较慢时容易出现明显的

* 收稿日期:2009-12-12

作者简介:曾祥华(1979—),男,讲师,博士生。

指向误差。当阵元数量较多时,天线阵形成的零陷深而窄,干扰入射角的微小变化,都可能极大恶化系统性能^[4]。另外,若干扰较强,干扰入射角的微小变化也可能恶化系统性能。

本文分析过程中,假设干扰、信号、噪声均不相关,且导航信号不会落在阵列的零陷内,H、T、* 分别表示共轭转置、转置和共轭,上标^表示估计值。

1 运动条件下的阵列信号模型

在卫星导航领域,干扰源和导航信号从远场入射,均不会引起入射角的剧烈变化。干扰和导航信号的入射角变化主要来源于阵列平台自身的运动。由于阵列平台的平移不会影响干扰和信号入射角的变化,也就不会影响接收机的抗干扰性能;本文中的运动特指阵列平台的转动,这类运动会导致干扰和信号入射角的变化。阵列平台自身的运动又可分为两类,第一类为平台存在高频的振动,如车载、机载(直升机)、舰载天线阵;第二类为平台存在平稳的转动,如手持、弹载天线阵。

元的接收通道的噪声,包括天线噪声和接收机内部噪声等,它与各个信号均不相关,通常可用高斯白噪声来近似,各阵元的噪声功率可认为相等。

平台运动条件下,将入射角 (φ_n, θ_n) 扩展为时变函数 $(\varphi_n(t), \theta_n(t))$,并写成离散形式(k 为采样时刻),运动条件下的天线阵输入信号矢量表示为

$$\mathbf{X}(k) = \sum_{n=0}^J \mathbf{v}_n(k) x_{n0}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_n(k) = [\exp\{-j2\pi f_{t_1}(\varphi_n(k), \theta_n(k))\} \dots \exp\{-j2\pi f_{t_N}(\varphi_n(k), \theta_n(k))\}]^T \quad (4)$$

将入射角 $(\varphi_n(k), \theta_n(k))$ 表示为平稳分量和变化分量两部分,并且由于干扰和信号均从远场入射,平台运动导致的干扰和信号的入射角变化均相同,因此

$$\varphi_n(k) = \varphi_n + \Delta\varphi(k) \quad n = 0, 1, \dots, J \quad (5)$$

$$\theta_n(k) = \theta_n + \Delta\theta(k) \quad n = 0, 1, \dots, J \quad (6)$$

2 MVDR 准则下的信干噪比估计

按照 MVDR (Minimum Variance Distortionless Response, 最小方差无失真响应) 准则,求得的最优权值^[1,13]

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{v}_0}{\mathbf{v}_0^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{v}_0} = \frac{[\sum_{n=0}^J p_n \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H + \delta^2 I]^{-1} \mathbf{v}_0}{\mathbf{v}_0^H [\sum_{n=0}^J p_n \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H + \delta^2 I]^{-1} \mathbf{v}_0} \quad (7)$$

无指向误差时,阵列输出信号的信干噪比为

$$SINR = \frac{P_s}{P_j + P_n} = \frac{\mathbf{w}^H (p_0 \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_0^H) \mathbf{w}}{\mathbf{w}^H [\sum_{n=1}^J p_n \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H + \sigma^2 I] \mathbf{w}} \quad (8)$$

工程中,输入信号的协方差矩阵通常采用 SMI^[6] (Sample Matrix Inversion, 样本矩阵求逆) 的方法估计得到,即

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{xx} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}(k) \mathbf{X}(k)^H \\ &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [(\sum_{n=0}^J \mathbf{v}_n(k) x_{n0}(k) + \mathbf{n}(k)) \cdot (\sum_{n=0}^J \mathbf{v}_n(k) x_{n0}(k) + \mathbf{n}(k))^H] \end{aligned} \quad (9)$$

K 为样本点数。由于卫星信号的导向矢量为时变函数,权值计算中期望信号的导向矢量由角度的平稳分量构成。此时,SMI 算法的权值为

$$\mathbf{w}_{smi} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1} \mathbf{v}_0}{\mathbf{v}_0^H \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1} \mathbf{v}_0} \quad (10)$$

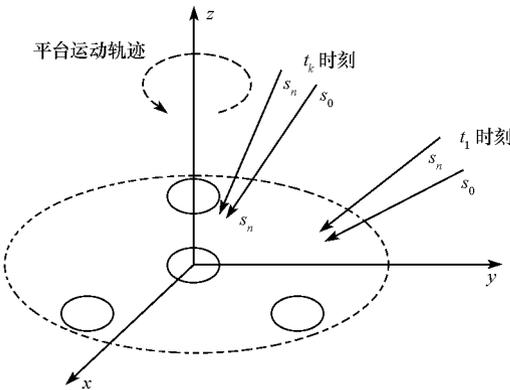


图1 运动条件下二维平面天线阵以及坐标系
Fig.1 Planar array and far-field co-ordinate systems under motion

取坐标系如图1所示,以坐标原点为参考点^[1,13],考虑 $1 + J$ 个信源的情况。信源 $s_n(t)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, J$) (约定 $s_0(t)$ 为导航信号源,其余为干扰源)从空间远场入射到 N 元天线阵列上,入射角为 (φ_n, θ_n) 。则天线阵的输入信号矢量表示为^[1,13]

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{n=0}^J \mathbf{v}_n x_{n0}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{v}(\varphi_n, \theta_n) = [\exp\{-j2\pi f_{t_1}(\varphi_n, \theta_n)\} \dots \exp\{-j2\pi f_{t_N}(\varphi_n, \theta_n)\}]^T \quad (2)$$

式中,对于信源 $s_n(t)$, \mathbf{v}_n 是导向矢量 $\mathbf{v}(\varphi_n, \theta_n)$ 的简记, $x_{n0}(t)$ 是参考点接收信号的复信号表示。而 $\mathbf{n}(t)$ 为噪声矢量,其第 i 个分量表示第 i 个阵

由于协方差估计和权值计算等操作,权值更新滞后于训练数据。在 M 时刻,阵列输出信号的信干噪比为

$$\begin{aligned} SINR_{smi} &= \frac{P_s}{P_j + P_n} \\ &= \frac{\mathbf{w}_{smi}^H (\rho_0 \mathbf{v}_0(M) \mathbf{v}_0^H(M)) \mathbf{w}_{smi}}{\mathbf{w}_{smi}^H \left[\sum_{n=1}^J P_n \mathbf{v}_n(M) \mathbf{v}_n^H(M) + \delta^2 I \right] \mathbf{w}_{smi}} \end{aligned} \quad (11)$$

联合第 2 节中两种不同的运动模型以及(7)~(9)式,分析如下:

(1)对于第一类运动模型(高频振动),可认为 $(\varphi_n(k), \theta_n(k))$ 服从正态分布,雷达系统中关于零陷展宽的文献大多是基于这一前提^[4,11-12]。基于不同的 $(\varphi_n(k), \theta_n(k))$ 分布特性,零陷展宽的方法略有不同,甚至不需要知道 $(\varphi_n(k), \theta_n(k))$ 的准确分布,只要最终的效果能够有效扩宽零陷即可。

(2)对于第二类运动模型(平稳转动),由于采样率较高而数据采集时间由 K 值决定,在平台非高速转动的情况下,可认为样本数据的入射角不变。例如,数据采样率为 20Mb/s, $K = 200$,平台绕 Z 轴旋转速度为 $360^\circ/\text{s}$,此时采样时间持续时间为 $10\mu\text{s}$,平台旋转角度为 0.0036° ,协方差矩阵估计值可写为

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\left(\sum_{n=0}^J \mathbf{v}_n(1) \mathbf{x}_{n0}(k) + \mathbf{n}(k) \right) \cdot \left(\sum_{n=0}^J \mathbf{v}_n(1) \mathbf{x}_{n0}(k) + \mathbf{n}(k) \right)^H \right] \quad (12)$$

3 仿真与验证

3.1 基本参数

本节仿真分析对比两种运动模型下,角度扰动、干扰强度、阵元数量等因素对阵列输出信干噪比的影响。

仿真的基本参数为:天线阵为 N 元平面均匀中心圆阵,阵元间距为波长之半,信号形式参照 GPS 与北斗卫星导航接收机的接收信号选取,导航信号为扩频信号,扩频码周期为 10 230,码率为 10.23Mb/s,信号带宽为 20.46MHz。导航信号数量为 1 个,入射角为 $(40^\circ, 240^\circ)$,载噪比取典型值 45dBHz;干扰数量为 2 个,入射角分别为 $(10^\circ, 60^\circ)$ 和 $(70^\circ, 100^\circ)$,干噪比为 100dBHz。这里干噪比为干扰功率与噪声功率谱密度之比,对应的干扰功率与噪声功率之比为 27dB。

仿真结果中用阵列输出载噪比代替阵列输出

信干噪比,两者相差 73.1dB。

3.2 仿真结果

仿真一:阵列平台为卫星导航系统中典型的 7 元中心圆阵和 4 元中心圆阵,平台振动导致的俯仰角和方位角扰动服从正态分布,即 $\Delta\varphi, \Delta\theta \sim N(0, \delta^2)$, δ 在 $0 \sim 5^\circ$ 变化,干噪比为 100dBHz。阵列输出载噪比随角度扰动的变化关系如图 2 所示。

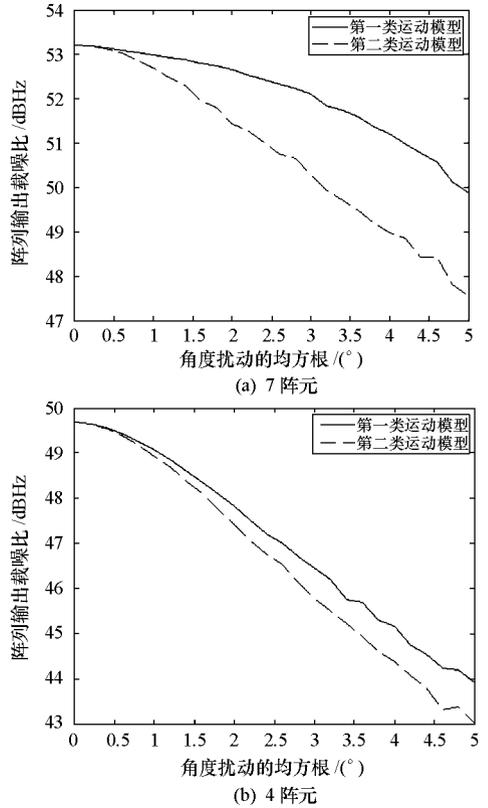


图 2 阵列输出载噪比随角度扰动的变化关系

Fig.2 The curve of CNR with various angle perturbation

仿真二:7 元中心圆阵和 4 元中心圆阵,角度扰动 δ 为 2° ,干噪比为 50~100dBHz。阵列输出载噪比随干扰强度的变化关系如图 3 所示。

仿真三: N 元中心圆阵,角度扰动分别为 2° 和 1° ,干噪比为 100dBHz,阵元数为 4~64。为避免阵元数量变化带来的增益,输出载噪比归一到相应阵元数无角度扰动时的载噪比上。阵列输出载噪比随阵元数量的变化关系如图 4 所示。

分析上述仿真结果,可得到如下结论:

(1)阵列输出载噪比随平台角度扰动的增加而恶化,对于 7 元中心圆阵和第二类运动模型,当角度扰动为 1° 时,载噪比损耗为 0.3dB,角度扰动为 3° 时,载噪比损耗达 3.3dB。这表明阵列零陷比较尖锐,当角度扰动大于 3° 时,载噪比恶化比较严重。

(2)阵列输出载噪比对干扰强度不敏感,在干

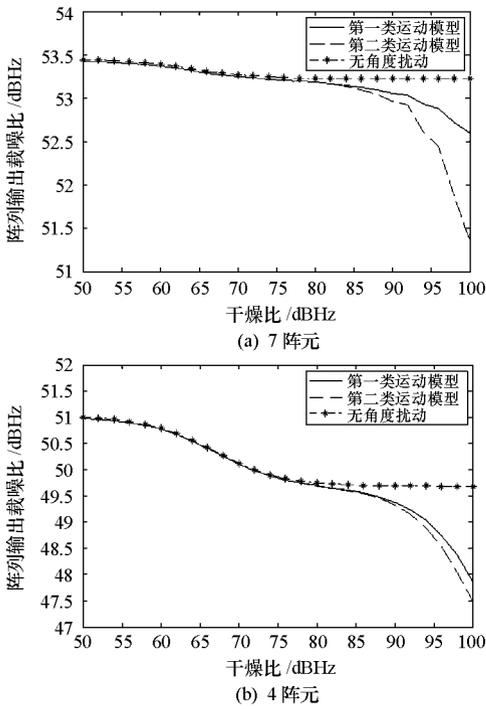


图3 阵列输出信干噪比随干噪比的变化关系
Fig.3 The curve of CNR with various JNR

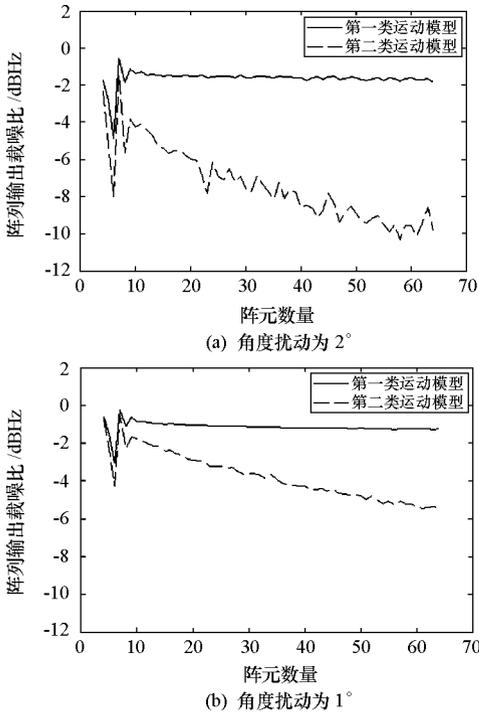


图4 阵列输出载噪比随阵元数量的变化关系
Fig.4 The curve of CNR with various array number

扰强度小于 80dBHz 时,输出载噪比基本不受干扰强度的影响,当干扰强度大于 80dBHz 且小于 100dBHz时,载噪比损耗约为 2dB,这是因为阵元数量有限,因而形成的零陷深度有限。

(3)对于第一种运动模型,当阵元数量大于 10 时,具有一定的稳健性;而第二种运动模型,阵元数量越大,形成的零陷越尖锐,对角度扰动越敏

感。

(4)各种情况下,采用第一类运动模型时,阵列性能均更稳健,表明第一类运动模型更适合运动情况下的阵列算法建模。

3.3 性能下降的原因分析

图 5 和图 6 给出了阵列输出残余干扰(加噪声)和信号功率随角度扰动的变化关系,残余干扰功率随角度扰动的增加而迅速增大,第二类运动模型比第一类运动模型更明显;信号功率随角度扰动变化较小。这是由阵列方向图自身的特征造成的,干扰方向的方向图比较尖锐,轻微的角度变化即会造成干扰对消效果的剧烈变化;信号方向的方向图比较平缓,角度变化不会引起信号功率的快速变化。所以在各种自适应滤波的稳健算法中,关注的重点是如何有效的抑制干扰。

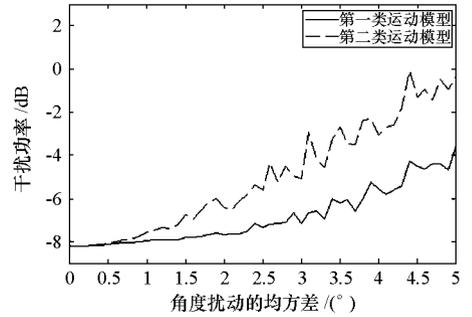


图5 阵列输出残余干扰功率(加噪声)随角度扰动的变化关系
Fig.5 The curve of the power of residual jammer and noise with various angle perturbation

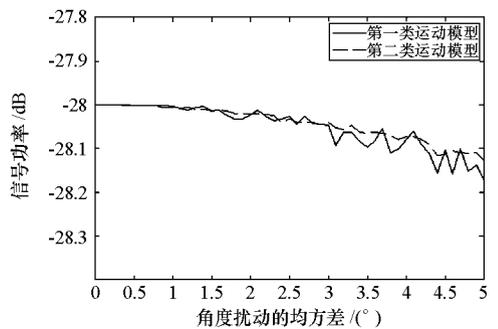


图6 阵列输出信号功率随角度扰动的变化关系
Fig.6 The curve of the power of signal with various angle perturbation

图 7 给出了角度扰动为 2°时,第一类和第二类运动模型下的 64 元均匀线阵的方向图。为更清晰地对比两种模型下方向图的区别,这里采用的是线阵而不是导航接收机常用的圆阵,其结论是类似的。信号数量为 1,入射角为 40°,载噪比为 45dBHz,干扰数量为 2,入射角分别为 10°和 70°,干噪比均为 100dBHz。从图中可以看出,第一

类运动模型形成的零陷明显宽于第二类运动模型,因此在角度扰动时有稳健的抗干扰效果。对于第一类运动模型,假设平台是高频振动的,协方差估计时相当于多个干扰从某一区域入射,因此能够形成更宽的零陷;而对于第二类运动模型,假设平台平稳转动,协方差估计时仅考虑了干扰的初始方向,因此只形成了一个较窄的零陷。从另一个角度考虑,若假设在干扰附近存在多个虚拟干扰^[9],从而使得阵列形成更宽的零陷,可以提高天线阵在运动条件下的稳健性。

从而不能有效抑制干扰,导致阵列性能的下降。本文建立了平台运动条件下的阵列信号模型,给出了两种运动模式下的信干噪比估计公式。进一步的仿真分析表明,对于阵元数量一定的导航接收机,角度扰动是影响性能的主要因素,干扰强度则影响较小。采用第一类运动模型时,阵列性能更优,因为阵列的振动等效于多个干扰从而导致零陷的展宽。对于阵型固定的导航接收机而言,提高权值更新速度减小运动造成的零陷指向误差和采取稳健的算法扩展零陷宽度是有效的措施。

参考文献:

- [1] 桑怀胜. 卫星定位接收机全局最优空时抗干扰技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2003.
- [2] Widrow B, Stearns S D. Adaptive Signal Processing[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall, 1985.
- [3] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall International Inc., 1996.
- [4] Gershman A B, Ulrich Nickel, Johann Bohme F. Adaptive Beamforming Algorithms with Robustness Against Jammer Motion [J]. IEEE Transaction on signal processing, 1997, 45(7): 1878 - 1885.
- [5] Applebaum S P, Chapman D J. Adaptive Arrays with Main Beam Constraints[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1976, AP24 (5): 650 - 662.
- [6] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electron. Syst., 1974, AES10(6): 853 - 863.
- [7] Hayward S D. Effect of Motion in Adaptive Arrays[J]. Proc. Inst. Elect. Eng., Radar, Sonar Navig., 1997, 144: 15 - 20.
- [8] Griffiths L J, Jim C W. An Alternative Approach to Linearly Constrained Adaptive Beamforming[J], IEEE Trans. on Ant. And Prop., 1982, 30: 27 - 34.
- [9] Mailloux R J. Covariance Matrix Augmentation to Produce Adaptive Array Pattern Thoughts[J]. Electronlet., 1995, 31(10): 771 - 772.
- [10] Michael Zatman. Comments on "Theory and Application of Covariance Matrix Tapers for Robust Adaptive Beamforming" [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2000, 48(6): 1976 - 1800.
- [11] 武思军,张锦中,张曙. 阵列波束的零陷加宽算法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2004,25(5):658 - 661.
- [12] 李荣锋,王永良,万山虎. 自适应天线方向图干扰零陷加宽方法研究[J]. 现代雷达,2003(2):42 - 45.
- [13] 王瑛. 卫星导航天线阵抗干扰关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2008.

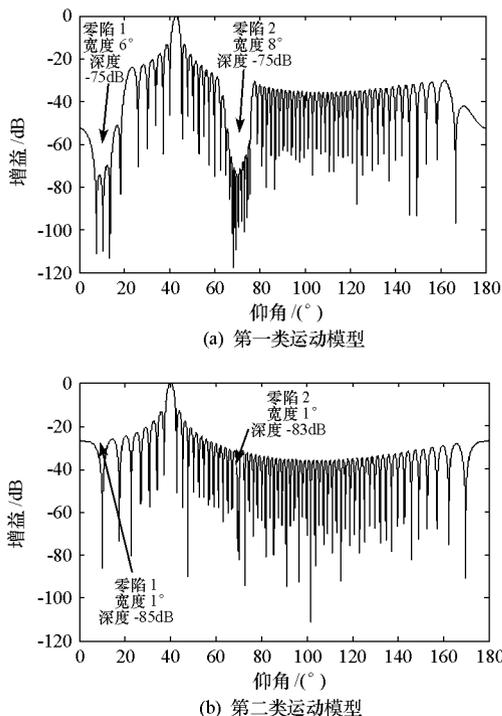


图7 均匀线阵的方向图

Fig.7 The patterns of uniform linear array

对于卫星导航接收机而言,常用的为4元中心圆阵和7元中心圆阵,提高运动条件下抗干扰性能的稳健性有两种可行的方法:一是提高阵列权值的更新速率,尽量减小由于平台运动导致的角度扰动;二是采取更稳健的抗干扰算法,扩展阵列零陷的宽度。

4 小结

卫星导航接收机应用于运动载体时,平台运动会导致阵列形成的零陷与干扰和信号方向失配,