

GPS 天线阵列盲信号波束形成研究*

刘海颖, 叶伟松, 李 静

(南京航空航天大学 高新技术研究院 南京 210016)

摘 要:针对 GPS 的抗干扰应用,给出一种不需要先验信息的 GPS 阵列天线盲信号波束形成新方法,用来提高 GPS 接收机的性能。首先建立线阵和平面阵列天线的信号模型,然后采用子空间技术剔除干扰信号,并设计多波束形成器来增强整个角空间的 GPS 信号。在波束形成设计中,应用 Dolph-Chebyshev 加权法来得到最优的主瓣波束宽度和旁瓣水平。仿真实验表明,采用盲信号波束形成方法,无论是线阵还是平面阵天线,均可以在干扰方向形成有效的零陷,在其余的角空间内增强 GPS 信号,从而验证了新方法的有效性和正确性。

关键词:全球定位系统; 天线阵列; 波束形成; 盲信号; 道夫-切比雪夫加权

中图分类号:TN911.7

文献标识码:A

文章编号:CN11-1780(2011)02-0004-06

引 言

全球定位系统(GPS)以其全天候、高精度等一系列显著特点,已广泛应用于军事和民用诸多领域。通常传输到接收机的 GPS 信号功率电平大约为 -160dBW ,比接收机热噪声低约 $20 \sim 30\text{dBW}$,潜伏在热噪声下传播,因此极易受到环境和人为干扰信号的影响^[1]。为了消除无意或人为干扰,各种抗干扰技术不断出现,包括时域和频域信号处理技术、组合抗干扰等,然而当干扰信号与 GPS 的频带相同时,以上方法均无法奏效。自适应波束形成是一种空域信号处理技术,可以有效消除干扰,从而成为 GPS 对抗研究的热点^[2-5]。

可以应用于 GPS 波束形成的技术有调零(Null Steering)^[2]、最小方差无失真响应(MVDR)^[3,4]以及最小均方误差(MMSE)^[5]等方法,其中调零是最简单的波束形成技术,需要知道 GPS 和干扰信号的波达方向(DOA)信息^[6,7]或其它统计信息,而且可能降低 GPS 信号强度;MVDR 法需要知道 GPS 信号的波达方向,且性能随着波达方向估计误差的增加而迅速降低;MMSE 法需要知道码相位信息,这在 GPS 信号捕获和跟踪完成前是很难做到的。以上方法通常都需要信号的先验信息,然而在实际应用中先验信息并不是总能预先得到的,因此研究在盲信号环境中的 GPS 波束形成技术具有重要意义。目前有关该方面的研究还不多见,文献[8]给出了一种盲信号波束形成方法,但仅应用于线阵天线。

对于波束形成中的波束控制,Dolph-Chebyshev 加权法^[9]是一种比较好的方法,可以设计最优的主瓣波束宽度和旁瓣水平,但通常只能应用于均匀线阵。基于奇异值分解的子空间技术^[10],利用特征矢量的正交性可以将接收信息分解为信号子空间和噪声子空间,在信号处理领域有重要应用。本文综合子空间和基于 Dolph-Chebyshev 加权法的多波束形成技术,给出了一种不需要先验信息的 GPS 阵列天线盲信号波束形成方法,不仅对于线阵而且对于平面阵列均有良好的效果,在抑制干扰的同时增强了整个角空间 GPS 信号强度。

2 信号模型

定义方位角为 φ ,仰角为 θ ,则信号从 (φ, θ) 方向入射到任意天线阵元上,其信号波向量为

$$\kappa = \alpha [\sin\theta\cos\varphi \quad \sin\theta\sin\varphi \quad \cos\theta]^T \quad (1)$$

* 航空科学基金项目(20090852011);南京航空航天大学基本科研业务费专项基金(NS2010219)

收稿日期:2010-11-22 修改稿日期:2010-12-24

其中, $\alpha = 2\pi/\lambda$ 为波数, $\lambda = c/f$ 为波长, c 为信号传播速度, f 为载波频率。设天线阵元数为 M , 第 i 个阵元相对于参考阵元的位置为

$$\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

则第 i 个阵元相对于参考阵元的相位差为 $\mathbf{k}^T \mathbf{p}_i$, 其接收信号为

$$\begin{aligned} s_i(t) &= a \exp(j(\omega_0 t + \mathbf{k}^T \mathbf{p}_i)) \\ &= s(t) \exp(j\mathbf{k}^T \mathbf{p}_i) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $s(t) = a \exp(j\omega_0 t)$ 为参考阵元的接收信号, a 为接收信号幅度, ω_0 为信号频率。

设有 K 个 GPS 信号和 L 个干扰信号到达天线阵列, 入射方向分别为 $(\varphi_{c,k}, \theta_{c,k})$ 和 $(\varphi_{j,l}, \theta_{j,l})$, 其中 $k = 1, 2, \dots, K, l = 1, 2, \dots, L$ 。设叠加到每个阵元的噪声为 $n_i(t)$, 则第 i 个阵元的输出为

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^K s_{c,k}(t) \exp(j\mathbf{k}_{c,k}^T \mathbf{p}_i) + \sum_{l=1}^L s_{j,l}(t) \exp(j\mathbf{k}_{j,l}^T \mathbf{p}_i) + n_i(t) \quad (4)$$

其中, $s_{c,k}(t)$ 和 $s_{j,l}(t)$ 分别为第 k 个 GPS 信号和第 l 个干扰信号在参考阵元的输出, $\mathbf{k}_{c,k}$ 和 $\mathbf{k}_{j,l}$ 分别为其波向量。天线阵列输出的矢量形式为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (5)$$

其中, $\mathbf{S}(t)$ 为 $(L+K) \times 1$ 维信号矢量, 包括 GPS 和干扰信号; $\mathbf{N}(t)$ 为噪声矢量; \mathbf{A} 为方向矢量阵。

对于线阵天线, 设 N 个阵元以间距 d 均匀分布在 y 轴, 若以阵列左侧第一个阵元为参考点, 则 $\mathbf{X}(t)$ 为 $N \times 1$ 维输出矢量, \mathbf{A} 为 $N \times (L+K)$ 维阵。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\varphi_1) \ \mathbf{a}(\varphi_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(\varphi_{L+K})] \quad (6)$$

其方向矢量为

$$\mathbf{a}(\varphi_i) = [1 \ \exp(j\alpha d \sin \varphi_i) \ \cdots \ \exp(j(N-1)\alpha d \sin \varphi_i)]^T \quad (7)$$

对于平面阵天线, 设由 N 行 N 列共 N^2 个阵元分布在 $x-y$ 面上, 行距和列距分别为 d_x 和 d_y , 以 $(1,1)$ 处的阵元为参考点, 则 $\mathbf{X}(t)$ 为 $N^2 \times 1$ 维输出矢量, \mathbf{A} 为 $N^2 \times (L+K)$ 维矩阵。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\varphi_1, \theta_1) \ \mathbf{a}(\varphi_2, \theta_2) \ \cdots \ \mathbf{a}(\varphi_{L+K}, \theta_{L+K})] \quad (8)$$

令 $\mu_x = \sin \theta \cos \varphi, \mu_y = \sin \theta \sin \varphi$, 则有

$$\mathbf{a}(\varphi_i, \theta_i) = \mathbf{a}(\mu_{xi}, \mu_{yi}) = \text{vec}(\mathbf{a}_x \mathbf{a}_y^T) \quad (9)$$

其中, $\text{vec}(\cdot)$ 运算符含义是将 $N \times N$ 维矩阵转换为 $N^2 \times 1$ 维列矢量, $\mathbf{a}_x = [1 \ \exp(j\alpha d_x \mu_{xi}) \ \cdots \ \exp(j(N-1)\alpha d_x \mu_{xi})]^T$, $\mathbf{a}_y = [1 \ \exp(j\alpha d_y \mu_{yi}) \ \cdots \ \exp(j(N-1)\alpha d_y \mu_{yi})]^T$ 。

设 GPS 信号、干扰信号以及各阵元的噪声相互独立, 则天线阵列输出的协方差阵为

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}(\mathbf{X}\mathbf{X}^T) = \sum_{k=1}^K P_{c,k} \mathbf{v}_{c,k} \mathbf{v}_{c,k}^T + \sum_{l=1}^L P_{j,l} \mathbf{v}_{j,l} \mathbf{v}_{j,l}^T + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (10)$$

其中, $P_{c,k}, P_{j,l}$ 以及 σ_n^2 分别为第 k 个 GPS 信号、第 l 个干扰信号以及噪声的功率; $\mathbf{v}_{c,k}$ 和 $\mathbf{v}_{j,l}$ 分别为 $\mathbf{v}_{c,k} = [\exp(j\mathbf{k}_{c,k}^T \mathbf{p}_1) \ \cdots \ \exp(j\mathbf{k}_{c,k}^T \mathbf{p}_M)]^T$ 和 $\mathbf{v}_{j,l} = [\exp(j\mathbf{k}_{j,l}^T \mathbf{p}_1) \ \cdots \ \exp(j\mathbf{k}_{j,l}^T \mathbf{p}_M)]^T$, 线阵时 $M = N$, 平面阵时 $M = N^2$ 。

2 GPS 盲信号波束形成

由于 GPS 信号功率远低于噪声功率, 则可以认为高于噪声功率的信号为干扰信号。设干扰信号功率远高于噪声功率, 则干扰信号在天线阵列输出的协方差阵中占主导因素, 因此可以采用子空间技术移除干扰信号, 设计出 GPS 接收机盲信号波束形成方案, 如图 1 所示。首先应用子空间技术剔除天线阵列接收信号中的干扰信号, 然后采用基于 Dolph-Chebyshev 加权的多级波束形成技术, 在整个角空间中增强 GPS 接收信号, 最后进行 GPS 信号的捕获与跟踪。

将子空间技术应用于 GPS 信号处理, 对式(10)的协方差阵做特征值分解

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^T \quad (11)$$

其中, U 为特征矢量, Σ 为特征值组成的对角阵

$$\Sigma = \text{diag}([\lambda_1 \ \lambda_2 \ \cdots \ \lambda_M]) \quad (12)$$

其中, $\lambda_i (i = 1, 2, \cdots, M)$ 为特征值, 线阵时 $M = N$, 平面阵时 $M = N^2$ 。对特征值进行排序, 使其满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_M$, 对应的特征矢量阵为

$$U = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_M] \quad (13)$$

其中, $e_i (i = 1, 2, \cdots, M)$ 为特征矢量, 具有互为正交的特性。

由于式(10)中干扰信号占主导地位, 因此前 L 个最大的特征值对应于干扰信号, 剩余的 $M - L$ 个特征值对应于 GPS 加噪声信号, 进而由特征值分别张成干扰信号子空间 U_I 和 GPS 加噪声的子空间 U_{Cn} , 即

$$U_I = \text{span}\{e_1, e_2, \cdots, e_L\} \quad (14)$$

$$U_{Cn} = \text{span}\{e_{L+1}, e_{L+2}, \cdots, e_M\} \quad (15)$$

由于 U_I 和 U_{Cn} 互为正交, 故将天线阵列的接收信号 X 投影到 U_{Cn} , 即可以剔除干扰信号, 得到

$$X_{Cn} = P_{Cn}X \quad (16)$$

其中, P_{Cn} 为投影矩阵, 可由下式得到

$$P_{Cn} = \sum_{i=L+1}^M e_i e_i^T \quad (17)$$

以上子空间技术需要干扰信号数 L , 据 GPS 信号功率远低于噪声功率的特性, 设定略高于噪声功率的阈值, 统计超过该阈值的特征值个数, 即可得到干扰信号数。通过子空间技术可以剔除干扰信号, 但 GPS 信号仍然淹没在背景噪声中, 因此需要进一步增强 GPS 信号, 下面采用 Dolph-Chebyshev 加权法进行线阵和平面阵的波束控制。由式(4)的第 i 个阵元输出 x_i , 取其加权值为 w_i , 则整个阵列的输出为

$$y = \sum_{i=1}^M w_i x_i \quad (18)$$

将上式取绝对值并归一化后, 得到阵列方向图为

$$G(\theta, \varphi) = |y| / \max(|y|) \quad (19)$$

Dolph-Chebyshev 加权的基本思想是利用 Chebyshev 多项式的展开式来定义权值, 多项式为

$$T_n(z) = \begin{cases} \cos(n \arccos(z)), & (|z| \leq 1) \\ \cosh(n \text{arccosh}(z)), & (|z| > 1) \end{cases} \quad (20)$$

对于阵元为 N 的线阵, 其响应为 $N - 1$ 级 Chebyshev 多项式, 选取 $z_0 > 1$, 确定一个 $T_{N-1}(z_0)$ 并取此值为主瓣幅值, 则旁瓣幅值为 z 在 ± 1 区间的 $|T_{N-1}(z)| = 1$ 的各点。给定主瓣与旁瓣幅值之比为 β , 可得

$$z_0 = \cosh(\text{arccosh}(\beta) / (N - 1)) \quad (21)$$

定义 Dolph-Chebyshev 窗为

$$W(\psi) = T_{N-1}(z_0 \cos(\psi/2)) / T_{N-1}(z_0) \quad (22)$$

其中, $\psi = \pi \sin \varphi$ 。根据 Chebyshev 多项式和三角恒等式, 可以将 $W(\psi)$ 展开为

$$W(\psi) = \sum_{n=-(N-1)}^{N-1} w_n \exp(jn\psi) \quad (23)$$

其中, 系数 w_n 可以由上式反变换得到。由于 $W(\psi)$ 为偶函数, 则有 $w_{-n} = w_n$, 因此将系数 $w_n (n = 0, 1, 2, \cdots, N - 1)$ 作为式(18)中的加权值, 则得到 Dolph-Chebyshev 加权法波束形成, 通过调整 β 即可得到所需要的阵列天线方向图。将 Dolph-Chebyshev 加权法扩展到平面阵, 修改 Dolph-Chebyshev 窗为

$$W(\psi_x, \psi_y) = \frac{T_{N-1}(z_0 \cos(\psi_x/2) \cos(\psi_y/2))}{T_{N-1}(z_0)} \quad (24)$$

其中, $\psi_x = \pi \mu_x = \pi \sin \theta \cos \varphi$, $\psi_y = \pi \mu_y = \pi \sin \theta \sin \varphi$ 。对式(24)进行取样, 得

$$W(l_1, l_2) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} W(n, m) \exp(-j2\pi(l_1 n + l_2 m) / N) \quad (25)$$

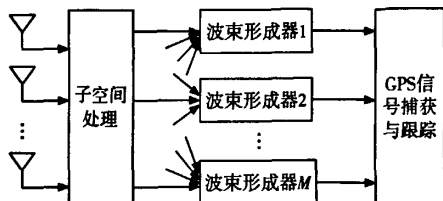


图1 GPS 盲信号波束形成原理

其中, $l_1 = 0, 1, \dots, N-1$; $l_2 = 0, 1, \dots, N-1$; $W(m, n) = w_{mn} \exp(j(N-1)(n+m)\pi/N)$ 。对式(25)进行离散傅立叶逆变换, 可得到 $W(m, n)$, 进而计算相应系数 w_{mn} , 即为面阵的 Dolph-Chebyshev 加权值。

由于 GPS 信号分布在整个角空间, 故需在应用 Dolph-Chebyshev 加权法获得最优主瓣宽度波束的同时, 设计多级波束形成器, 在整个角空间增强 GPS 信号。对于线阵天线, 设计 N 个波束形成器指向为

$$k_{y,n} = 2n\pi/Nd, n = 0, \pm 1, \dots, \pm N/2 \quad (26)$$

则对应的指向矢量为

$$\vec{v}_{y,n} = \exp[0 \quad jk_{y,n}d \quad \dots \quad jk_{y,n}(N-1)d] \quad (27)$$

综合子空间与多级波束形成技术, 则第 n 个波束形成器的输出为

$$y_n = \sum_{i=1}^N w_i v_{y,n,i} x_{Gn,i} \quad (28)$$

其中, w_i 为 Dolph-Chebyshev 加权值, $v_{y,n,i}$ 为指向矢量 $\vec{v}_{y,n}$ 的第 i 个元素, $x_{Gn,i}$ 为由式(16)的子空间处理后的第 i 个阵元输出。将式(28)代入式(19)即可得到线阵天线的方向图。对于面阵天线, 同样进行类似处理, 可以在 (θ, φ) 的角空间中设计多级波束形成器。

3 仿真实验及分析

对本文方法进行仿真实验。对于线阵 GPS 天线, 采用间距为 $d = \lambda/2$ 的 7 阵元, 不进行子空间处理时仿真结果如图 2 所示, 其中图 2(a)为均匀加权 ($w_i = 1, i = 1, 2, \dots, 7$) 时的方向图, 图 2(b)为采用 Dolph-Chebyshev 加权法的结果, 设计主瓣比旁瓣高 25dB, 取 $\beta = 10^{25/20}$, 图 2(c)为 Dolph-Chebyshev 加权法的多级波束形成结果, 图 2(d~f)分别为图 2(a~c)的极坐标表示。由图 2 可以看出, 采用 Dolph-Chebyshev 加权法在抑制旁瓣的同时可以增加主瓣宽度, 采用多级波束形成器可以在整个角空间提高 GPS 信号强度, 在整个角空间最差的 GPS 功率为 -2.478dB。将子空间与基于 Dolph-Chebyshev 加权法的多波束形成技术进行综合, 设两个干扰信号分别来自方向 $\varphi = 30^\circ$ 和 $\varphi = 150^\circ$, 仿真结果如图 3 所示, 其中图 3(a)为 7 个多波束形成器的方向图, 图 3(b)为其包络值, 图 3(c)为对应的极坐标表示。

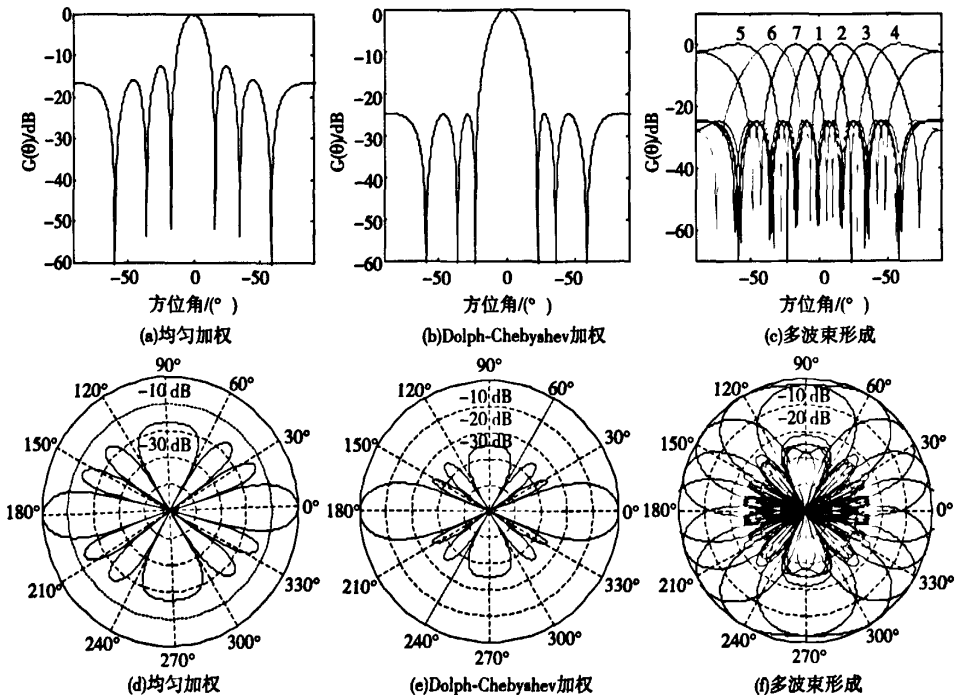


图 2 均匀线阵方向图

进一步对平面阵 GPS 天线进行仿真,采用间距为 $d_x = d_y = \lambda/2$ 的 5×5 阵元,不进行子空间处理时仿真结果如图 4 所示,其中图 4(a)为均匀加权的方向图,图 4(b)为 Dolph-Chebyshev 加权法的结果,仍取 $\beta = 10^{25/20}$,图 4(c)为其俯视图。可以看出本文将 Dolph-Chebyshev 加权法扩展到平面阵的设计是有效的。将多波束形成与子空间技术进行综合,设计俯仰和方位间隔均为 45° 共 17 个不同指向的波束形成器,仿真结果如图 5 所示,其中图 5(a)为干扰信号来自方向 $(\varphi, \theta) = (30^\circ, 80^\circ)$,波束形成指向为 $(0^\circ, 0^\circ)$ 的方向图,图 5(b)为多波束形成器的包络,图 5(c)为干扰来自 $(140^\circ, 10^\circ)$ 方向的结果。

从仿真结果可以看出,本文的盲信号波束形成方法对于线阵和平面阵列均是有效的,其特点如下:

①由于应用子空间技术剔除了天线阵列接收信号中的干扰信号,根据剔除干扰信号后的 GPS 信号设计波束形成器,可以有效地在干扰方向形成零陷,而不必预先指定干扰方向;

②基于 Dolph-Chebyshev 加权的多级波束形成技术,可以在整个角空间中增强 GPS 接收信号强度(除了干扰方向所处的角空间的零陷外),进而提高 GPS 的捕获和跟踪性能,而不必考虑 GPS 信号的方向。

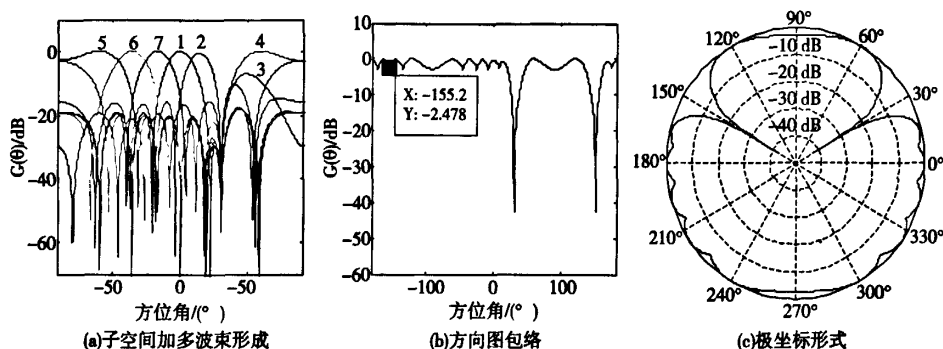


图 3 子空间/多波束形成综合线阵方向图

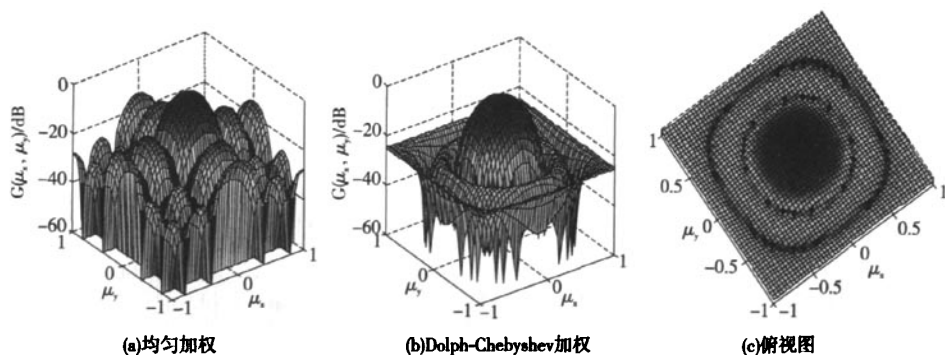


图 4 平面阵方向图

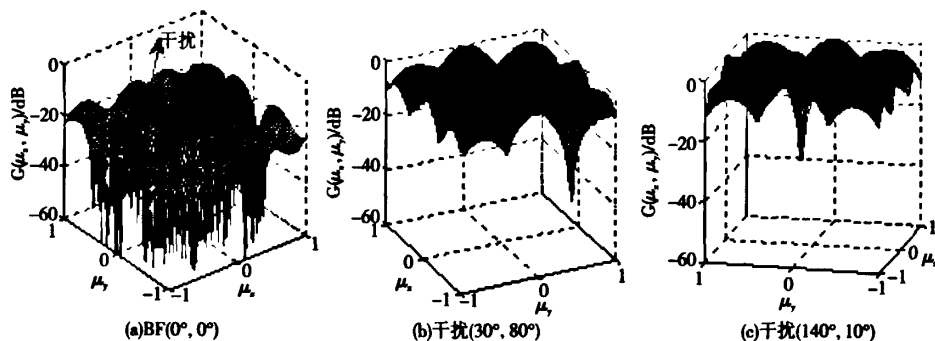


图 5 子空间/多波束形成综合平面阵方向图

4 结束语

本文给出了一种 GPS 阵列天线盲信号波束形成新方法,应用子空间技术剔除天线阵列接收信号中的干扰信号,基于 Dolph-Chebyshev 加权法设计了多级波束形成器,经过对这两步骤的综合,无需先验信息便可实现干扰信号的抑制和 GPS 信号的增强。理论分析和仿真实验表明,该方法不仅可以实现 GPS 线阵天线盲信号波束形成,而且对于平面阵列也具有良好的效果。本文的方法对于 GPS 抗干扰问题的研究和系统设计具有较大的应用价值。

参考文献

- [1] Borre K, Akos D M, Bertelsen N, et al. A Software- Defined GPS and Galileo Receiver[M]. Birkhäuser, Boston, 2007:1 ~ 135.
- [2] Cheuk W C, Trinkle M, Gray D A. Null-steering LMS Dual-Polarised Adaptive Antenna Arrays for GPS[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005,4(1):258 ~ 267.
- [3] Trinkle M, Gray D. GPS Interference Mitigation: Overview and Experimental Results[C]. The 5th International Symposium on Satellite Navigation Technology & Applications. Canberra, Australia, GPS Society press, 2001:1 ~ 14.
- [4] 王李军, 杨小牛, 赵惠昌. 基于 GPS/INS 与天线阵列的导航系统抗干扰设计与分析[J]. 电讯技术, 2008,48(7):18 ~ 23.
- [5] David S D, Gautier J, Rife J, et al. Adaptive Array Processing for GPS Interference Rejection[C]. Institute of Navigation's GNSS Conference, Long Beach, American, 2005:618 ~ 628.
- [6] 潘 捷, 周建江, 汪 飞. 基于流形分离技术的稀疏均匀圆阵快速 DOA 估计方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4):963 ~ 966.
- [7] 丁 锐, 钱志鸿, 王 雪. 基于 TOA 和 DOA 联合估计的 UWB 定位方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2):313 ~ 317.
- [8] Zheng Y H, Trinkle M, Gray D A. GPS Blind Beamforming Technique[C]. Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Symposium on GPS/GNSS, Sydney, Australia, 2007:1 ~ 11.
- [9] Safaai J A. A New Formulation for the Design of Chebyshev Arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994,42(3):439 ~ 443.
- [10] Latyshev V V. Subspace-based Estimation of Time of Arrival and Doppler Shift for a Signal of Known Waveform[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2009,1(3):209 ~ 214.

Blind Beamforming Technique for GPS Antenna Array

Liu Haiying, Ye Weisong, Li Jing

Abstract: Aiming at the GPS anti-jamming applications, a blind beamforming technique with no prior information of received data for GPS antenna array is presented, which can improve the performance of GPS receiver. Firstly the signal models of linear array as well as planar array are constructed, then the subspace technique is used to remove the interferences, and the multiple beamformers are built to enhance the GPS signals covering the whole angular space. The Dolph-Chebyshev weighting method is used for the beamforming design, which provides the optimum mainlobe beamwidth for a fixed sidelobe level. The simulation result indicates that both the linear and planar arrays can have nulls at the interference direction and enhance GPS signals for the rest angular space with the blind beamforming method.

Key words: GPS; Antenna array; Beamforming; Blind signal; Dolph-Chebyshev weighting

[作者简介]

刘海颖 1980 年生, 副研究员, 博士, 主要研究方向为导航定位与测量、航天测控系统、精密仪器及机械等。

叶伟松 1982 年生, 助理研究员, 硕士, 主要研究方测试计量技术及仪器、航天测控等。

李 静 1981 年生, 博士生, 主要研究方向为通信与测控、精密仪器及机械等。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>