

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0072- 06

## 基于步进频率正交信号的星载 MIMO-GMTI 雷达空时频处理研究\*

邹博, 赖涛, 梁甸农

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 多发多收(MIMO)体制雷达综合采用多通道、多频技术,为解决星载 GMTI 面临的探测慢速运动目标和消除盲速估计等问题提供了有效途径。MIMO 雷达工作的基础是有效的波形设计。因此,在分析正交波形性能的基础上,结合 GMTI 应用需求,建立了星载 MIMO 雷达步进频率正交信号的基本参数确定准则,研究了步进频率 MIMO 雷达空时频联合自适应处理的基本原理,通过仿真验证了 MIMO 雷达在杂波抑制和 GMTI 性能上的优势。

**关键词:** MIMO 雷达; 地面运动目标指示; 步进频率信号; 空时频自适应处理

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A

## Study of Space time Frequency Processing for Spaceborne MIMO-GMTI Radar Based on Stepped Frequency Orthogonal Waveform

ZOU Bo, LAI Tao, LIANG Dian-nong

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

**Abstract:** Synthesizing the multiple-channel and multiple-frequency techniques, the multiple-input multiple-output (MIMO) radar can provide a feasible approach for solving the problems in spaceborne GMTI, such as slowly-moving target detection, and blind speed zones reduction. Effective orthogonal waveform design is crucial for MIMO radar implementation. Therefore, based on an analysis of the performance of orthogonal waveform, with the application of GMTI, the optimized basic parameter choice criteria for stepped frequency orthogonal waveform of spaceborne MIMO radar was proposed. Then, the basic principle of combined space, time and frequency adaptive processing was studied. Finally, simulation results were presented to demonstrate the superiority of MIMO radar in improving clutter suppression and GMTI performance.

**Key words:** MIMO radar; ground moving target indication (GMTI); stepped frequency signal; space-time-frequency adaptive processing

利用星载雷达实现地面运动目标指示(GMTI)功能具有重要的军事应用价值。多发多收(MIMO)雷达<sup>[1]</sup>,由于其综合采用了多通道、多波形(多频)技术,利用较少的阵元便能形成丰富的等效相位中心资源和(或)频域资源,提供更多的系统自由度。将多发多收体制应用于星载雷达,通过对地表回波的空时频联合处理<sup>[2]</sup>,可提高最小可检测速度(MDV)和测速范围的指标,为探测慢速运动目标和消除盲速估计等问题提供有效途径。

正交波形设计是 MIMO 雷达实现的关键<sup>[3]</sup>,MIMO 体制下正交波形可分为两大类,一类是具有相同频带的编码正交信号;一类是频带互不交叠的频率正交信号。对于星载 MIMO 雷达对地观测系统而言,在存在严重地杂波和干扰的情况下,编码正交信号之间的互相关能量无法忽略,导致多个正交编码信号的综合积分旁瓣比(ISLR)不小于 0dB,应用于星载 MIMO 雷达成像和 GMTI 时,接收的回波或图像对比度会很差,难以满足性能需求。本文采用步进频率正交信号模式,对星载 MIMO-GMTI 雷达的空时频联合自适应处理进行研究。

\* 收稿日期:2009- 11- 11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60902092,60901071);国家部委资助项目(51321030101)

作者简介:邹博(1982-),男,博士生。

## 1 步进频率正交信号原理和基本参数确定准则

发射步进频率正交信号是消除系统模糊,增加系统自由度,提高 GMTI 性能的有效途径<sup>[4]</sup>。相邻脉冲发射不同频率信号有利于消除距离模糊,每个子阵列发射不同频率信号有利于消除角度、多普勒模糊。考虑到系统设计的限制和信号处理的复杂度问题,采用每个子阵列发射不同频率信号,相邻脉冲发射相同频率信号的方案。

步进频率线性调频信号是指一组载频按固定步长  $\Delta f$  递增(递减)的脉冲序列,  $L$  个步进频率信号可表示为<sup>[5]</sup>:

$$s_n(t) = u(t) e^{j2\pi(f_0 + n\Delta f)t}, \quad n = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

其中,信号的复包络  $u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}(\frac{t}{T}) e^{j\pi k t^2}$ , 调频斜率  $k = B/T$ ,  $B$  为带宽,  $T$  为脉冲宽度。

星载 MIMO 雷达信号参数的确定需要综合考虑各种因素的相互制约,结合 GMTI 应用,给出几种信号参数的确定准则。

### (1) 工作频率

针对星载 GMTI 应用,信号工作频率主要从多普勒效应、电离层影响、天线尺寸等综合考虑。GMTI 雷达利用动目标回波的多普勒频移进行检测,动目标多普勒频移为  $f_d = \frac{2Vf}{c}$ , 不仅与目标和雷达的相对径向速度成正比,而且与电磁波的频率成正比,频率越高,多普勒频移越显著,越有利于慢速运动目标的检测。电离层对电磁波的影响主要体现在 Doppler 效应和相位色散,这些影响均随着工作频率的增加而减小,对 C 波段以上雷达的影响可以忽略。同时,考虑到卫星载体空间、能量受限的影响,选择雷达工作在 X 波段是合理的。

### (2) 带宽

为提高动目标检测性能,距离向分辨率要和目标尺寸相当,以保证目标位于一个距离分辨单元内,即:  $D_{\text{res}} \approx \frac{c}{2B}$ , 以目标尺寸 5m 为例, GMTI 模式下需要每个子带的带宽为 30MHz。

### (3) 脉冲重复频率

高 PRF 会导致距离模糊,远程目标要和近程杂波竞争,引起输出信号杂波加噪声比(SCNR)的下降。低 PRF 会导致速度多普勒模糊,增加杂波自由度,产生测速盲区,如图 1 所示。

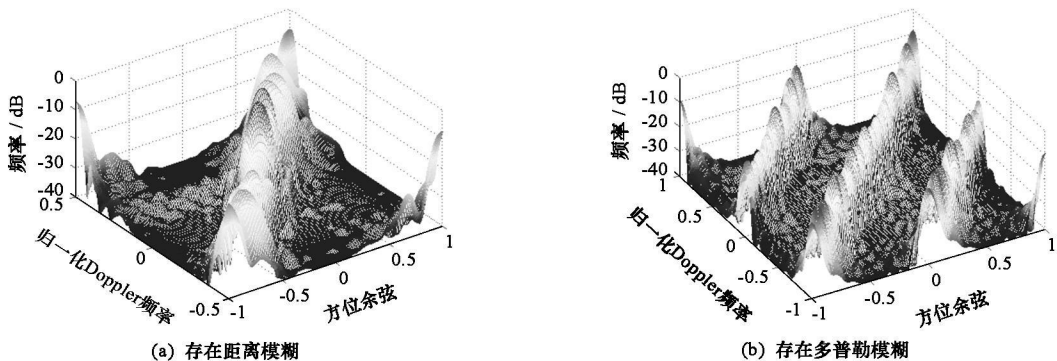


图 1 杂波功率谱空时二维分布

Fig. 1 Space time distribution of clutter power spectrum

假设星载雷达发射信号的波长为  $\lambda$ , 平台沿方位向运行速度为  $v$ , 测绘带远距端波束入射角为  $\theta$ , 雷达到测绘带远距端的斜距为  $R_f$ , 天线俯仰向孔径为  $l_r$ , 方位向孔径为  $l_a$ , 光速为  $c$ , 则为保证距离多普勒不模糊,对 PRF 的约束为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{2v}{l_a} \leq PRF \leq \frac{cl_r}{2\mathcal{R}_r \tan \theta_f} \quad (2)$$

如果星载 GMTI 雷达不可避免地存在距离和多普勒模糊, 即  $\frac{d_r}{2\mathcal{R}_r \tan \theta_f} \leq \frac{2v}{l_a}$  时, 系统设计倾向于采用中低 PRF, 令  $PRF \leq \frac{d_r}{2\mathcal{R}_r \tan \theta_f}$ , 保证距离不模糊的同时, 利用每个子阵列发射不同频率信号消除角度、多普勒模糊。

与此同时, PRF 的选择还要考虑对相参积累脉冲数的影响。对于广域监视 GMTI, 希望在较短的波束驻留时间内获得较多的积累脉冲数, 这就需要提高 PRF 以满足上述要求, 因此, PRF 的选择需要对模糊和相干积累等因素进行综合考虑。

#### (4) 步进频率间隔的选择

定义互相关函数与自相关函数的最大值之比为相关系数, 显然, 希望步进频率正交信号之间的相关系数越小越好。根据相关系数对步进频率正交信号频率间隔的选择进行分析。假设步进频率信号频率起点为 10GHz, 脉冲宽度 40 $\mu$ s, 调频带宽为 30MHz, 采样频率为 60MHz, 仿真相关系数随频率间隔的变化曲线如图 2 所示。

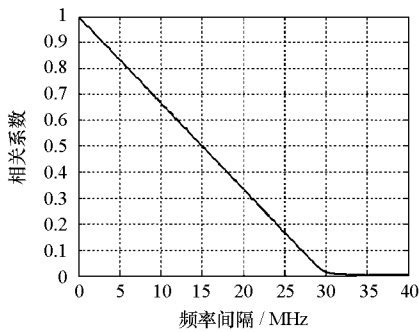


图 2 相关系数随频率间隔变化曲线  
Fig. 2 Curve of correlation coefficient

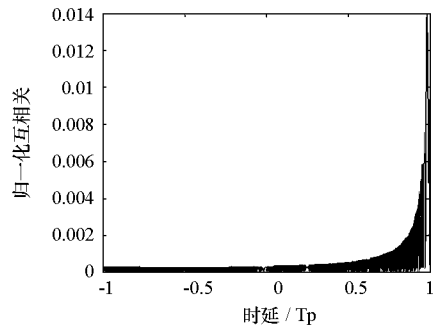


图 3 频率正交信号互相关曲线  
Fig. 3 Curve of cross-correlation

由图 2 可知, 当步进频率间隔大于带宽, 即两信号频带互不交叠时, 相关系数接近于 0, 信号完全正交。选择  $\Delta f = 30\text{MHz}$ , 两信号间的互相关曲线如图 3 所示, 此时, 步进频率信号之间的互相关能量已经非常小, 考虑互相关能量, 计算包括自相关旁瓣能量和互相关能量在内的综合 ISLR 为 -9.5027dB, 与单一线性调频信号 -9.7dB 的 ISLR 性能相差不大, 完全满足星载 MIMO 雷达成像和 GMTI 性能要求。同时, 考虑到雷达平台运动导致的杂波频移和频带展宽问题, 为了便于对不同发射信号进行分离, 需要使频率间隔满足  $\Delta f > B + d_{\max}$ , 其中,  $B$  为信号带宽,  $d_{\max}$  为杂波多普勒带宽。

## 2 信号模型和空时频联合自适应处理

理论上, 充分利用空、时、频信息的处理方法有望获得较好的杂波抑制性能<sup>[7-8]</sup>。如图 4 所示, 天线为一线性阵列, 阵列轴线方向与载体运动方向相同,  $N$  个子阵列相对于原点位置  $\{d_n, n = 0, 1, \dots, N-1\}$ 。阵列中每个子阵列同时发射频率递增的步进频率信号, 所有子阵列接收反射信号。则  $N$  个子阵列对应的发射信号频率集合为  $\{f_n = f_0 + n\Delta f, n = 0, 1, \dots, N-1\}$ , 第  $n$  个频率对应的发射信号为

$$s_n(t) = \sqrt{E}u(t)e^{j2\pi f_n(t + m'f_r)} \quad (3)$$

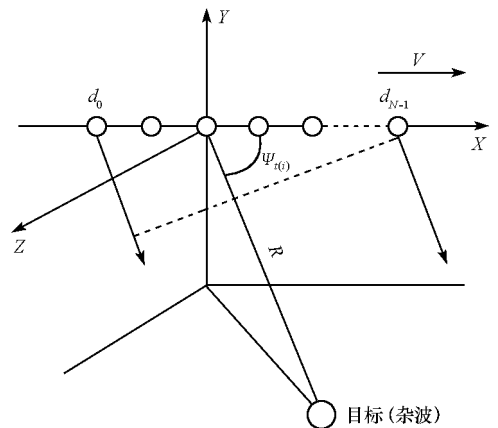


图 4 星载 MIMO 雷达示意图  
Fig. 4 Configuration of spaceborne MIMO radar

式中,  $u(t)$  如式(1)中定义;  $m = 0, 1, 2 \dots M-1$ , 为一个相干处理时间内的发射脉冲个数,  $E$  为发射脉冲能量,  $T_r$  为脉冲重复时间,  $t$  为快时间。

MIMO 雷达的信号处理过程是: 将每个子阵列接收的所有回波信号通过带通滤波器分离成  $N$  路步进频率信号, 再针对每路信号进行解调和匹配滤波, 处理后第  $n$  个子阵列第  $m$  个脉冲的接收信号可以表示为<sup>[9]</sup>

$$y_{n,m} = \{A_t e^{j \frac{2\pi v_r}{c} [d_n - d_l] + 2v_r n d_r} + \sum_{i=0}^{N_c-1} A_i e^{j \frac{2\pi v_r}{c} [\cos \Psi_i (2VmT_r + d_n - d_l)]} + y_{n,m}^{noise} \mid l = 0, 1, \dots, N-1\} \quad (4)$$

式中:  $A_t$ , 目标反射信号幅度;  $v_r$ , 目标相对于平台的径向速度;  $\Psi_l$ , 目标入射锥角;  $N_c$ , 杂波单元个数;  $A_i$ , 第  $i$  个杂波单元反射信号幅度;  $\Psi_i$ , 第  $i$  个杂波单元入射锥角;  $y_{n,m}^{noise}$ , 第  $n$  个阵元对应的高斯白噪声。

将一个空时频快拍内的杂波和噪声回波按空间、时间、频率顺序表示成  $NMV \times 1$  维的向量  $Y_{c,n}$ , 则杂波和噪声的协方差矩阵可表示为

$$R_{c,n} = E\{Y_{c,n} Y_{c,n}^H\} \quad (5)$$

式中“ $H$ ”表示共轭转置。相应地, 对于单位目标, 将接收到的  $N$  个不同频率信号对应的空时导向矢量按空间、时间、频率顺序表示成  $NMV \times 1$  维的目标导向矢量  $S_{sf}$ , 根据线性约束最小方差(LCMV)准则<sup>[21]</sup>, 空时频联合自适应处理最优权值为

$$W_{opt} = \mu R_{c,n}^{-1} S_{sf} \quad (6)$$

其中,  $\mu$  为常数。最优空时频处理器的改善因子为

$$IF_{opt} = S_{sf}^H W_{opt}^H \cdot \frac{\text{tr}(R_{c,n})}{S_{sf}^H S_{sf}} \quad (7)$$

输出  $SCNR$  为

$$SCNR_{out} = \frac{S_{sf}^H W_{opt}^H W_{opt} S_{sf}}{W_{opt}^H R_{c,n} W_{opt}} \quad (8)$$

杂波抑制的目的是完成运动目标检测, 输出  $SCNR$  是空时处理器性能的重要指标, 是决定运动目标检测概率和虚警概率的直接因素, 在给定虚警概率下, 检测门限和检测概率计算公式为:

$$\eta = \sqrt{2 \lg(1/P_{fa})} \quad (9)$$

$$P_d = \int_{\eta}^{\infty} u \exp\left[-\frac{\left(u^2 + SCNR_{out}\right)}{2}\right] I_0\left(u \sqrt{SCNR_{out}}\right) du \quad (10)$$

其中,  $P_{fa}$  是虚警概率,  $\eta$  是检测门限,  $P_d$  是检测概率。

### 3 仿真结果及分析

假设星载稀疏阵雷达沿方位向分布, 由 10 个完全相同的子阵列构成, 根据第 1 节参数确定准则, 选取系统参数如表 1 所示。采用步进频率 MIMO 雷达模式进行仿真, 选取频率间隔为 35MHz 的 10 载频多发多收模式, 其中, 10 个子阵列对应的 10 个发射载频分别为 {10GHz, 10.035GHz, 10.07GHz, 10.105GHz, 10.14GHz, 10.175GHz, 10.21GHz, 10.245GHz, 10.28GHz, 10.315GHz}, 每个子阵列接收所有发射信号, 处理流程如图 5 所示。

表 1 星载 MIMO 雷达系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of spaceborne MIMO radar

子阵列数	子阵列间隔/m	脉冲数/M	中心频率/GHz	脉冲重复频率/Hz	卫星平台速度/(m/s)
10	5.5	64	10	2000	7480

首先仿真分析步进频率信号在改善速度、角度模糊和提高运动目标检测概率方面的作用。假定杂波服从复高斯分布, 噪声为高斯白噪声,  $CNR = SNR = 25\text{dB}$ 。针对中心频率为 10GHz、10.105GHz、10.28GHz 的单一频率信号分别进行 STAP 处理, 改善因子如图 6 所示。由于选取中低脉冲重复频率, 系统存在速度多普勒模糊, 同时阵列稀疏导致栅瓣和角度模糊, 引起杂波多普勒混叠产生运动目标检测盲

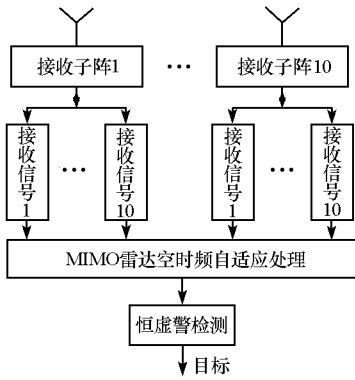


图5 MIMO雷达信号处理流程

Fig. 5 Steps of MIMO signal processing

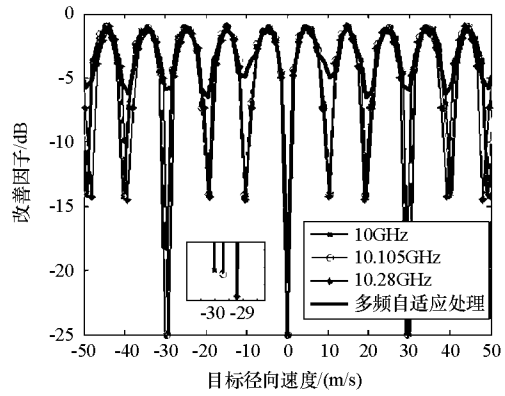


图6 改善因子随目标径向速度变化曲线

Fig. 6 Curves of improvement factor

区。进一步,从图6中放大部分可以明显看出,不同中心频率对应的角度模糊和多普勒模糊位置不同,这就为采用步进频率信号的空时频联合处理消除模糊提供了可能。针对步进频率MIMO雷达10发10收模式进行空时频自适应处理仿真,改善因子如图6所示,步进频率MIMO雷达系统空时频联合自适应处理比单载频STAP性能明显提高,有效改善了低PRF导致的多普勒盲区,一定程度上改善了角度模糊。单一频率和多频STAP处理输出SCNR比随目标径向速度变化曲线如图7所示,图8是虚警概率 $P_{fa} = 10^{-6}$ 时的检测特性曲线,由式(10)可知,当输出SCNR达到15dB时,检测概率接近1。空时频联合处理后,可测速范围增大,检测概率增大,GMTI性能得到提高。

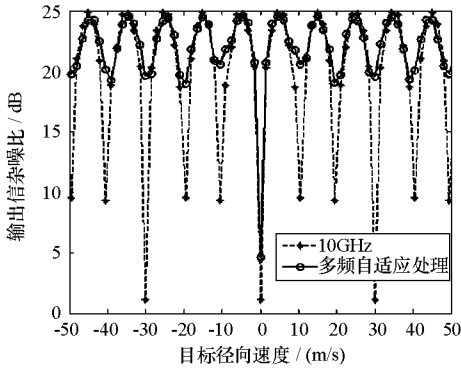


图7 输出SCNR随目标径向速度变化曲线

Fig. 7 Curves of output SCNR

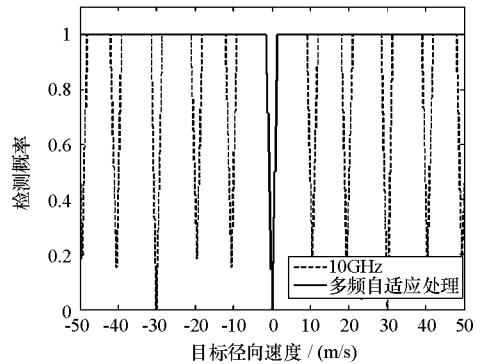


图8 检测概率随目标径向速度变化曲线

Fig. 8 Curves of detectable probability

需要强调的是,空时频联合处理虽然在一定程度上改善了角度模糊,但并不能完全消除栅瓣和角度模糊,仍然会对检测性能产生影响。根据阵列信号处理理论,随着阵列结构随机性的加强,阵列方向图的规则栅瓣逐渐被不规则的旁瓣所代替,随机阵列方向图的这一特性可用于消除均匀稀疏阵固定栅瓣造成的测速盲区,提高检测概率,文献[4]通过大量仿真表明,要想获得随机化的旁瓣,对阵元位置施加标准差为 $1/5$ 平均阵元间距的随机扰动是必要的。因此,我们可在均匀稀疏阵位置基础上加入均值为0,标准差为 $\sqrt{2}$ 的服从高斯分布的随机位置偏差,随机稀疏阵空时频联合处理输出信杂噪比曲线如图9所示,仿真结果表明,随机阵空时频处理输出SCNR损失减小,且对不同的速度,输

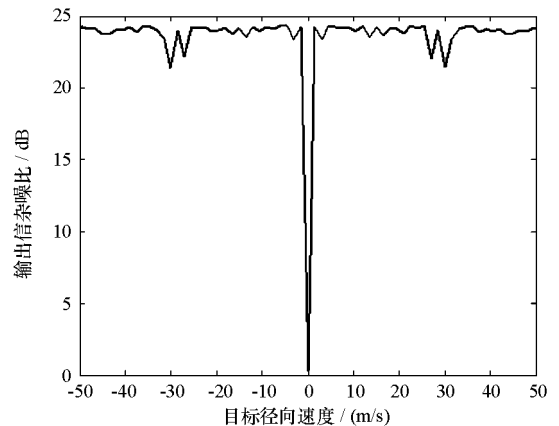


图9 随机阵输出SCNR变化曲线

Fig. 9 Curve of output SCNR for random array

出  $SCNR$  趋于一致,能够进一步改善稀疏导致的角度模糊问题,提高系统的杂波抑制性能。

## 4 结论

针对星载雷达 GMTI 应用,建立了 MIMO 雷达步进频率正交信号的基本参数确定准则,在此基础上,介绍了步进频率 MIMO 雷达的信号模型,并通过空时频联合自适应处理仿真,验证了 MIMO 雷达在杂波抑制和 GMTI 性能上的优势。常规自适应处理方法获得高性能的前提是:必须具有足够的独立同分布的训练样本,但星载雷达所处的杂波环境往往是非均匀的,因此,非均匀环境下的空时频联合处理及其降维方法将是下一步需要深入研究的内容。

## 参考文献:

- [1] Fishler E, Haimovich A, Blum R S, et al. MIMO Radar: An Idea Whose Time Has Come[C]//Proc. IEEE Radar Conference, 2004: 71–78.
- [2] Klemm R. Space-time Adaptive Processing Principles and Applications[M]. The Institution of Electrical Engineers, London, 1998.
- [3] Derg Hai. Polyphase Code Design for Orthogonal Netted Radar Systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(11): 3126–3135.
- [4] 陆必应. 天基 GMTI 与解模糊方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [5] 吴顺君, 梅晓春. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 68–71.
- [6] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 159–162.
- [7] Leatherwood D A, Melvin W L, Gamham J. High-fidelity MTI Modeling and Analysis of a Distributed Aperture Spaceborne Concept[C]//AIAA Space 2000 Conference & Exposition, 2000.
- [8] Leatherwood D A, Melvin W L, Berger S. Adaptive Signal Processing for a Spaceborne Distributed Aperture[C]//AIAA Space 2001 Conference & Exposition, 2001.
- [9] Chen Chun-Yang, Vaidyanathan P P. MIMO Radar Space-time Adaptive Processing Using Prolate Spheroidal Wave Functions[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(2): 623–635.

(上接第 71 页)

## 参考文献:

- [1] Ramon G, Peter d M, Mario S. Enhanced Patch-antenna Performance by Suppressing Surface Waves Using Photonic-bandgap Substrates[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2131–2138.
- [2] Dan S, Li J Z, Romulo F J B, et al. High-impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden frequency band[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2059–2074.
- [3] 闫敦豹, 高强, 等. 一种基于改进高阻表面的微带天线[J]. 电子学报, 2004, 33(3): 511–513.
- [4] Jing L, Hung-Yu D Y. Radiation Characteristics of a Microstrip Patch Over an Electromagnetic Bandgap Surface[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2007, 55(6): 1691–1697.
- [5] McKinzie W E, Rogers S D, Fulton M D. Experimental Results of an AMC Antenna Fabricated with a Magnetically-loaded Elastomeric Substrate[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008: 1–4.
- [6] Hajj M, Rodes E, Monediere T. Dual-band EBG Sectoral Antenna Using a Single-layer FSS for UHF Application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 161–164.
- [7] Dan Q, Lotfolkh S F. Improving Microstrip Patch Antenna Performance Using EBG Substrates[J]. IEE Proc. Microw. Antennas Propag, 2006, 153(6): 558–563.
- [8] Fu Y Q, Yuan N C. Elimination of Scan Blindness in Phased Array of Microstrip Patches using Electromagnetic Bandgap Materials[J]. IEEE Antennas Wireless Propag, 2004, 3: 63–65.