

机载稀疏阵天线空时杂波谱的深入研究

唐 斌, 汪学刚, 陈客松, 赵建宏

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】针对机载稀疏阵列天线雷达的空时杂波谱特性进行了研究,发现不同的稀疏方法和时域脉冲数都对杂波协方差矩阵的秩以及杂波谱有影响。提出在稀疏后的阵列中如果在任意两个阵元间所含的半波长的个数小于等于时域脉冲的个数,且同时保持总的阵列孔径不变,那么无论稀疏后阵列中还剩余多少个有效阵元,杂波协方差矩阵的秩都保持不变。用数值仿真对多种稀疏方法下的阵列空时杂波谱进行了分析,数值结果与所提理论相一致。

关键词 机载雷达; 杂波抑制; 空时自适应处理; 稀疏阵
中图分类号 TN957 **文献标识码** A

New Results on Space-Time Clutter Spectra for Airborne Sparse Antenna Arrays

TANG Bin, WANG Xue-gang, CHEN Ke-song, and ZHAO Jian-hong

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract An investigation of space-time clutter spectrum for airborne sparse array applications is given in both theory and simulation, and shown that both the rank and the spectrum of clutter covariance matrix are dependent on the sparse configuration as well as the number of temporal samples. The analysis finds that if the total aperture is unchanged and the number of half-wavelength included in any interelement spacing is lower than the number of temporal pulses, the rank of clutter covariance matrix remain unchanged, no matter how many active elements are remained. The numeric results show good agreement with the proposed theorem.

Key words airborne radar; clutter suppression; space-time adaptive processing; sparse arrays

机载稀疏阵列天线是指采用阵列稀疏技术的机载相控阵天线。机载稀疏阵列天线接收的有用信号必须与强地杂波抗争。空时自适应处理(STAP)^[1-5]能有效地抑制强地杂波干扰,适用于机载预警雷达。为此,必须首先研究机载稀疏阵天线回波的谱特性。文献[6]在面阵稀疏成的伪圆阵上进行干涉仪与STAP混合处理,指出稀疏后的16阵元伪圆阵提供了比8阵元水平线阵更高的检测性能,但未深入研究机载稀疏阵雷达回波谱特性。文献[7]发现稀疏后的杂波协方差矩阵秩与稀疏方法有关,指出随机间隔的稀疏阵能避免产生栅瓣,并提供相对低的降维损失,但仅用数值仿真指出杂波协方差矩阵秩与稀疏方法有关。本文分析机载稀疏阵雷达回波空时采样的谱特性,指出杂波协方差矩阵秩以及杂波空时二维功率谱不仅与稀疏方法有关,而且与时域脉冲数存在内在关系,提出了相关的定理和推论。

1 机载稀疏阵雷达空时二维采样

空时二维信号处理是对信号进行时域和空域的二维采样^[1]。设时域采样数为 M ,对于 $L \times N$ 的面阵,经列向合成后,对 N 个等效阵元形成的均匀线阵进行空域采样(阵元间距为 d)。 λ 为波长, V_p 为载机速度, f_r 为脉冲重复频率。稀疏后等效线阵的阵元数为 N_A ,各阵元与第1个阵元的间距分别为 d_1, d_2, \dots, d_{N_A} ,显然 $d_1 = 0$ 。

对于每一个时域快拍, N_A 个等效阵元接收到的信号是一个 $N_A \times 1$ 维的空域采样矢量:

$$\mathbf{X}_s(m) = [x(m, 1), x(m, 2), \dots, x(m, N_A)]^T \quad (1)$$

式中 m 表示第 m 个时间快拍; $x(m, n)$ 表示第 n 个阵元的接收信号。通过 M 次时间采样得到的 M 个空间采样矢量按下式构成的 $N_A M \times 1$ 维矢量 \mathbf{X} 就是待处理的空时二维信号:

收稿日期: 2007-05-22; 修回日期: 2008-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(60702070)

作者简介: 唐 斌(1974-), 男, 博士生, 主要从事自适应信号处理、阵列信号处理方面的研究。

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_s^T(1), \mathbf{X}_s^T(2), \dots, \mathbf{X}_s^T(M)]^T \quad (2)$$

某一目标的有用信号可表示为 $\mathbf{X}_p = \mathbf{a} \cdot \mathbf{S}$ 。其中 \mathbf{S} 为有用信号的二维导引矢量; \mathbf{a} 为其幅度。 \mathbf{S} 定义如下:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_t \otimes \mathbf{S}_{sA} \quad (3)$$

式中 \otimes 表示Kronecker直积; \mathbf{S}_t 为时域导引矢量; \mathbf{S}_{sA} 为稀疏阵列空域导引矢量。

2 机载稀疏阵雷达回波的谱特性

2.1 谱特性的理论分析

为了简化讨论的复杂性, 本文中仅讨论 $\beta = \frac{2V_p T_r}{d} = 1$ 时 ($T_r = \frac{1}{f_r}$) 的情况。对于 $\beta \neq 1$ 的情况, 将另文撰出。关于稀疏阵杂波协方差矩阵的秩, 本文特给出如下定理及其推论。

定理 1 设稀疏后总的孔径不变, U 为稀疏后任意两个阵元间的间距中所含半波长个数大于时域脉冲时所形成的无效等效阵元的个数, 那么稀疏阵杂波协方差矩阵的秩为 $N + M - 1 - U$ (把一个阵元在某个采样脉冲下所处的位置称为等效阵元)。

证明: 脉冲数为 M , 满阵阵元数为 N , 保持满阵的孔径不变进行稀疏, 稀疏后的有效阵元数为 N_A 。每个脉冲重复间隔(PRI)中载机移动的路程等于半个波长, 即满阵的阵元间隔。因此, 满阵采样总的等效孔径随着载机运动而变大; 时域脉冲越多, 等效孔径越大; 同时载机的运动也提供了冗余采样。当阵列总的孔径不变时, 稀疏阵因为载机运动而增加的等效孔径与满阵相同, 即孔径增量均为 $(M-1)\lambda/2$, 总的等效孔径为 $(N + (M-1))\lambda/2$ [8]。

当稀疏后阵元间距变大, 因载机运动, 原先满阵的冗余采样在无效阵元处将可能变为非冗余采样, 也可能仍然是冗余采样, 这与时域脉冲数 M 有关。设稀疏后各阵元间的间距分别为 $\Delta d_{1-2}, \Delta d_{2-3}, \dots, \Delta d_{(N_A-1)-N_A}$, 其中, $\Delta d_{i-(i+1)}$ 表示第 i 个阵元与第 $i+1$ 个阵元间的间距。

若稀疏后的阵元间距中的最大值为:

$$\max(\Delta d_{i-(i+1)}) > M\lambda/2 \quad (4)$$

则稀疏阵在 M 个脉冲采样的运动过程中, 在某些无效阵元处所有有效阵元都不能形成等效采样。所有大于 $M\lambda/2$ 的阵元间距形成集合 Q 为:

$$Q = \{\Delta d_{i-(i+1)} \mid \Delta d_{i-(i+1)} > M\lambda/2, \\ 1 < i < N_A - 1\} \quad (5)$$

则集合 Q 中每个元素减去 $M\lambda/2$ 后除以 $\lambda/2$ 得到不能形成等效采样的无效阵元个数的集合:

$$P = \{p_i \mid p_i = (\Delta d_{i-(i+1)} - M\lambda/2)/(\lambda/2), \\ \Delta d_{i-(i+1)} \in Q\} \quad (6)$$

总的不能形成等效采样的无效阵元数为:

$$U = \sum_{p_i \in P} p_i \quad (7)$$

即总的等效孔径下的等效阵列是稀疏线阵, 其中无效的等效阵元个数是 U , 有效的等效阵元数是 $N + M - 1 - U$ 。设各有效的等效阵元相对第1个等效阵元的空时相位分别为 $\varphi_1 = 0, \varphi_2, \dots, \varphi_{N+M-1-U}$, 则杂波总的等效空时导引矢量为:

$$\mathbf{S}_Z = [1 \quad \exp\{j\varphi_2\} \quad \dots \quad \exp\{j\varphi_{N+M-1-U}\}]^T \quad (8)$$

因为 $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \dots \neq \varphi_{N+M-1-U}$, 由傅里叶基的性质知, \mathbf{S}_Z 矢量各个分量间相互正交, 构成一组正交基, 故杂波协方差矩阵秩为 $N + M - 1 - U$ 。

证毕。

定理1实际是Brennan定理[7]在稀疏阵下的推广。由以上定理可得如下推论。

推论 1 无论稀疏后有效阵元数多少, 只要总的孔径不变, 且稀疏后任意两个阵元间的间距中所含半波长个数小于等于时域脉冲的个数, 那么稀疏阵杂波协方差矩阵的秩都保持不变, 等于 $N + M - 1$ 。

推论1实际上是定理1 $U = 0$ 时的特殊情况。

推论 2 设稀疏后总的孔径减少 $B\lambda/2$, 且任意两个阵元间的间距中所含半波长个数小于等于时域脉冲的个数, 那么稀疏阵杂波协方差矩阵的秩为 $N + M - 1 - B$ 。

证明: 因载机运动而产生的孔径增量为 $(M-1)\lambda/2$, 但因稀疏后总孔径减少 $B\lambda/2$, 故总的等效孔径为 $((N-B) + (M-1))\lambda/2$, 且由推论1可知, 当任意两个阵元间的间距中所含半波长个数小于等于时域脉冲的个数时, 稀疏阵的没有无效的等效阵元, 所有等效阵元位置均有采样, 符合Nyquist采样定理。因此, 稀疏阵杂波协方差矩阵的秩为 $N + M - 1 - B$ 。

证毕。

推论 3 设稀疏后总的孔径不变, 任意两个阵元间的间距中所含半波长个数均大于时域脉冲的个数, U 为稀疏后任意两个阵元间的间距中所含半波长个数大于时域脉冲时所形成的无效等效阵元的个数, 那么稀疏阵杂波协方差矩阵为满秩矩阵, 秩为 $N + M - 1 - U$, 维数为 $(N + M - 1 - U) \times (N + M - 1 - U)$ 。

证明: 由定理1可知, 当题设条件满足时, 稀疏阵杂波协方差矩阵, 秩为 $N + M - 1 - U$ 。

由于任意两个阵元间的间距中所含半波长的个数均大于时域采样脉冲的个数，因此载机运动不会形成冗余采样；又由于有效的等效阵元个数是 $N + M - 1 - U$ ，故稀疏阵的杂波协方差矩阵的维数为 $(N + M - 1 - U)(N + M - 1 - U)$ ，所以稀疏阵的杂波协方差矩阵是满秩矩阵。

证毕。

由杂波协方差矩阵的所有非零特征值对应的特征矢量张成的空间就是杂波子空间^[9-10]。所以，杂波子空间维数实际上就对应杂波特征值个数。

2.2 谱特性的数值分析

仿真1 设满阵为 $N=24$ ，稀疏后有效阵元数 $N_A=12$ ，时域脉冲数 $M=16$ 。按如下8种情况分析：

- (1) 不稀疏的满阵；(2) 取连续的 N_A 个阵元，阵元间距仍为 $\lambda/2$ ；(3) 在满阵的两端各连续取 $N_A/4$ 个阵元，使中间剩余的 $N/2$ 个阵元无效；(4) 每隔一个阵元就使下面一个阵元无效，阵元间距变为 λ ；(5) 每隔两个连续阵元就使下面两个连续阵元无效；(6) 每隔3个连续阵元就使下面3个连续阵元无效；(7) 每隔4个连续阵元就使下面4个连续阵元无效；(8) 保留两端的两个阵元，中间任意选 N_A-2 个阵元。

以上情况均满足任意两个阵元间的间距中所含

半波长个数小于等于时域脉冲的个数。

图1为各种稀疏方法下的特征谱。7种稀疏方法中，第(2)种稀疏方法下的大特征值数为27，小于满阵的秩39，为最小秩，其他如第(3)~(8)种稀疏方法的秩分别为39、38、37、36、35、39。随着孔径的减小，杂波协方差矩阵的大特征值数也随之减少，与推论2结果吻合。由推论1知只要总的孔径不变，在一个CPI期间，从所有的等效阵元位置至少采样一次的稀疏阵列将与满阵具有相同的杂波秩，但总的系统自由度从 NM 将变为 $N_A M$ ，这意味着可提供的自由度中需用于杂波抑制的部分更高，而提供目标增益的维数更少，因此，检测性能有所降低。

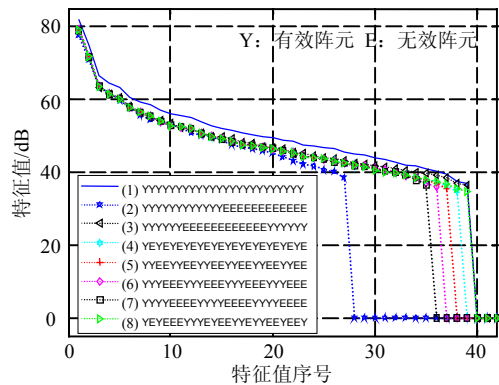


图1 各种稀疏方法下的特征谱

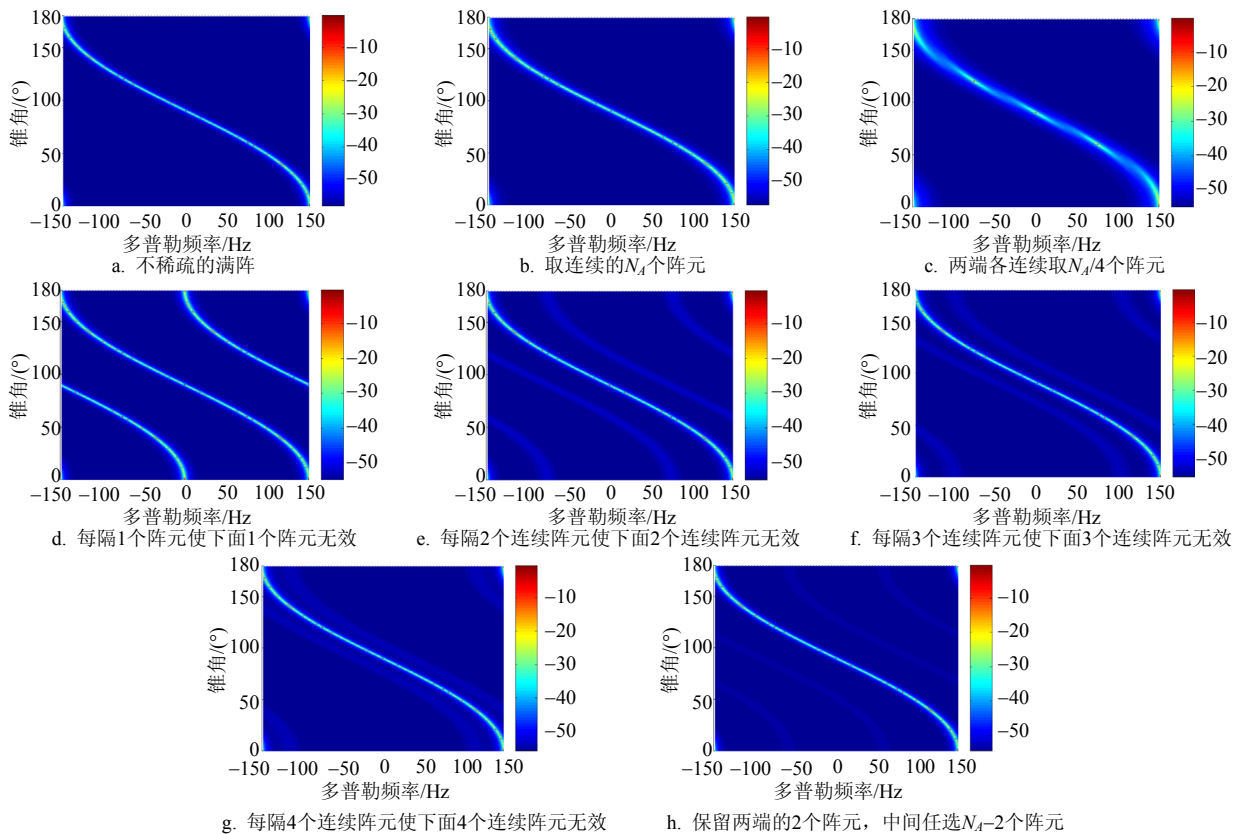


图2 满阵与各种稀疏方法下的杂波谱的俯视图的比较

图2是这8种情况下的杂波谱的俯视图。可看出,在稀疏后阵元数不变情况下,虽然不同稀疏方法得到杂波协方差矩阵可能具有相同的秩,但空时二维杂波谱是不同的。有些稀疏方法所产生的杂波谱中主杂波脊外的起伏非常明显。随机间隔的稀疏阵能尽量避免产生栅瓣,并提供相对低的降维损失。

仿真2 设满阵为 $N = 24$, 稀疏时改变阵元数,但孔径不变,即除保持孔径的两个阵元外,剩余阵元任意放置,时域脉冲数为 $M = 6$ 。分为如下8种情况:(1) 不做任何稀疏的满阵;(2) 取 $N_A = 3$, 保留的阵元为第1、8、24个阵元,所有阵元间的间距中所含半波长个数均大于时域脉冲的个数;(3) 取 $N_A = 4$, 保留的阵元为第1、7、16、24个阵元,所有阵元间的间距中所含半波长个数均大于时域脉冲的个数;(4) 取 $N_A = 5$, 保留的阵元为第1、3、10、20、24个阵元,最大和第二大阵元间的间距中所含半波长个数大于时域脉冲的个数;(5) 取 $N_A = 6$, 保留的阵元为第1、3、10、18、20、24个阵元,最大和第二大阵元间的间距中所含半波长个数小于时域脉冲的个数;(6) 取 $N_A = 7$, 保留的阵元为第1、4、9、11、16、20、24个阵元,所有阵元间的间距中所含半波长个数均小于时域脉冲的个数;(7) 取 $N_A = 16$, 保留的阵元为第1、3、4、5、8、10、11、12、13、16、17、19、20、21、22、24个阵元,所有阵元间的间距中所含半波长个数均小于时域脉冲的个数;(8) 取 $N_A = 22$, 保留的阵元为第1、2、3、4、5、7、8、9、10、11、12、13、14、16、17、18、19、20、21、22、23、24个阵元,所有阵元间的间距中所含半波长个数均小于时域脉冲的个数。

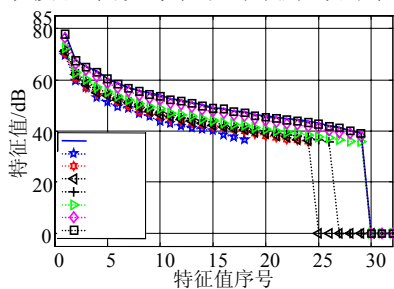


图3 孔径不变,阵元数改变的稀疏方法下的特征谱

如图3所示,第(6)~(8)种的情况表明:无论稀疏后有效阵元数多少,只要总的孔径不变,且任意两个阵元间的间距中所含半波长个数小于等于时域脉冲的个数,那么杂波协方差矩阵的秩都保持不变,均与满阵秩相同,与推论1一致;第(2)~(5)种情况表明:当稀疏后最大两个阵元间的间距中所含半波长个数大于时域脉冲的个数时,所形成的无效等效

阵元的个数就是杂波协方差矩阵的秩减小的数量,验证了定理1。

任意稀疏阵在一定条件下能与同孔径的满阵具有相同秩的原因是满阵提供了冗余采样。在阵元数较少且阵元的最大间距较大时,可以通过增大采样脉冲数来对杂波进行采样以减少无效的等效阵元,而增大采样脉冲数的成本并不高。当稀疏后阵元间距所含半波长的个数均相等且均刚好等于脉冲数时,此时稀疏阵的杂波采样没有信息冗余。另外,必须引起注意的是第(2)、第(3)种情况,在所有的等效的阵元位置均无冗余采样,其有效的等效阵元有 $N_A M$ 个,又因杂波协方差矩阵的维数恰好是 $N_A M \times N_A M$,故杂波协方差矩阵是满秩矩阵,全是大特征值,没有小特征值,与推论3一致。

3 结 论

针对机载稀疏阵天线回波的空时自适应处理问题,本文研究了杂波协方差矩阵的秩以及杂波谱。首次指出总的孔径不变时,无论稀疏后有效阵元数多少,如果稀疏后任意两个阵元间的间距中所包含半波长个数小于等于时域脉冲的个数,那么杂波协方差矩阵的秩都保持不变,具有较好的抑制杂波能力;如果有部分阵元间距大于时域脉冲个数,则杂波协方差矩阵秩减少,杂波抑制能力变差;如果任意两个阵元间的间距中所包含半波长个数都大于时域脉冲的个数,那么杂波协方差矩阵的秩减少且杂波谱中没有明显的主杂波脊,杂波抑制性能很差;如果稀疏后总的孔径减少,则杂波协方差矩阵秩也随之减少。本文定理及推论对机载稀疏阵雷达面向实际战场有理论指导意义。

参 考 文 献

- [1] KLEMM R. Principles of space-time adaptive processing[M]. London, UK: IEE Press, 2002.
- [2] KLEMM R. Applications of space-time adaptive processing[M]. London, UK: IEE Press, 2004.
- [3] MELVIN W, GUERCI J R. Knowledge-aided signal processing: a new paradigm for radar and other advanced sensors[J]. IEEE Trans-AES, 2006, 42(3): 983-996.
- [4] TANG Bin, WANG Xue-gang. Computationally-efficient two stage hybrid framework for STAP in nonhomogeneous environment[C]//The 5th International Conference of Microwave and Millimeter Wave Technology. Guilin, China: [s.n.], 2007.

(下转第878页)

应用于微波波段。利用该结构设计的微波滤波器具有小型化和高 Q 值的特点,能更好地适应工程需要。

参 考 文 献

- [1] CURITS J A, FIEDZIUSZKO S J. Miniature dual mode microstrip filters[J]. IEEE MTT-S Dig, 1991, 2: 443-446.
- [2] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Realization of quasielliptic function filter using dual-mode microstrip square loop resonators[J]. Elec Lett, 1995, 31: 2085-2086.
- [3] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Canonical microstrip filter using square open-loop resonators[J]. Elec Lett, 1995, 31: 2020-2022.
- [4] YAO S J, BONETTI R, WILLIAMS A E. Generalized dual-plane multicoupled line filters[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1993, 41: 2182-2189.
- [5] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a novel meander loop resonator[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1995, 5(11): 371.
- [6] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Microstrip slow-wave open-loop resonator filters[R]. School of Electronic and Electrical Engineering University of Birmingham: Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, UK.
- [7] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Microstrip cross-coupled trisection bandpass filters with asymmetric frequency characteristics[J]. IEE Proceedings Online, 1999, 146: 84-90.
- [8] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Design of Highly selective microstrip bandpass filters with a single pair of attenuation poles at finite frequencies[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 48: 1098-1107.
- [9] JOKELA K T. Narrow-band stripline or microstrip filters with transmission zeros at real and imaginary frequencies[J]. IEEE Iseetransactions on Microwavs Theory and Tschniquqs 1980, (6): 542-547.
- [10] YANG Chu-chen, CHANG Chi-yang. Microstrip Cascade Trisection Filter[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1999, 9: 271-273.
- [11] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Design of highly selective microstrip bandpassfilters with a single pair of attenuation poles at finite frequencies[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, 7: 1098-1107.
- [12] HONG Jia-Sheng, LANCASTER M J. Microstrip filters for RF/microwave applications[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [13] HONG Jia-sheng, LANCASTER M J. Couplings of microstrip square open-loop resonators tor cross-coupled planar microwave filters[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, 1996, 12: 2099-2109.
- [14] HONG Jia-sheng. Couplings of asynch ronously tuned coupled microwave resonators[J]. IEE Proc Microwaves, Antennas and Propagation, 2000, 147: 354-358.
- [15] LI Fei, ZHANG Xue-qiang, LI Chun-guang, et al. A new coupling matrix extracting method from the frequency response[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55: 760-767.
- [16] HANNA E, JARRY P, KERHERVE E, et al. General prototype network with cross coupling synthesis method for microwave filters-application to suspended substrate filters[C]//Int Workshop on Microwave Filters. Toulouse, France: [s.n.], 2004: 13-15.

编 辑 熊思亮

(上接第863页)

- [5] 曹建蜀, 汪学刚. 机载前向阵雷达近程杂波频移补偿[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3): 320-323.
CAO Jian-shu, WANG Xue-gang. Doppler compensation in airborne forward-Looking radar for ground short range Clutter[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2006, 35(3): 320-323.
- [6] HALE T B, TEMPLE M A, RAQUET J F, et al. Elevation in terferometric STAP using a thinned planar array[C]//Proceedings of the IEEE Radar Conference. Long Beach, California, USA: IEEE, 2002.
- [7] WARD J. Space-time adaptive processing with sparse antenna arrays[C]//Conference Record of the Thirty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers. Pacific Grove, CA, USA: [s.n.], 1998.
- [8] BRENNAN L E, STAUDAHER F M. Subclutter visibility demon-stration[R]. Technical Report RL-TR-92-21. [S.l.]: Adaptive Sensors Inc, 1992.
- [9] 汪学刚. 机载预警雷达中的时空二维信号处理方法[D].西安: 西安电子科技大学, 1992.
WANG Xue-gang. Time-space 2-D signal processing approach for airborne early warning radar[D]. Xi'an: Xidian University, 1992.
- [10] FRIEDLANDER B. A subspace method for space time adaptive processing[J]. IEEE Trans-SP, 2005, 53(1): 74-82.

编 辑 税 红