

文章编号: 2095-4980(2013)05-0765-05

基于空频解耦的宽带 DOA 估计算法

苏志刚^{a,b}, 温 宙^b, 刘海涛^b, 吴仁彪^b

(中国民航大学 a. 中欧航空工程师学院; b. 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

摘 要: 宽带波达方向(DOA)估计是宽带阵列信号处理领域的热点问题, 当宽带信号的距离分辨率与宽带孔径可比拟时, 孔径渡越效应会成为影响宽带波达方向估计精确度的重要因素。基于宽带阵列信号在空域与频域间呈现线性耦合的特点, 利用梯形变换进行解耦处理, 并对解耦后数据相干积累进行 DOA 估计。实验结果表明, 通过对宽带孔径渡越效应的消除, 宽带 DOA 估计精确度显著提高。该算法具有较低的计算复杂度和较高的 DOA 估计精确度, 是一种有效的宽带 DOA 估计算法。

关键词: 宽带信号; 孔径渡越时间; 梯形变换; 宽带波达方向估计

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201305.0765

DOA estimation of wideband signal based on Keystone transform

SU Zhi-gang^{a,b}, WEN Zhou^b, LIU Hai-tao^b, WU Ren-biao^b

(a.Sino-European Institute of Aviation Engineering; b.Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Direction Of Arrival(DOA) estimation for wideband signal is one of the hot issues in wideband array signal processing. Aperture fill effect is an important factor to affect the estimation precision of wideband DOA when wideband signal range resolution and wideband aperture are comparable. On the basis of the linear coupling characteristic between spatial domain and frequency domain of wideband array signal, Keystone transform is adopted for decoupling. Then the decoupled data is used for DOA estimation with coherent accumulation method. The results of simulation show that the precision of DOA estimation is improved remarkably by eliminating the effect of aperture fill effect. The proposed algorithm is an effective method due to its lower computational complexity and higher DOA estimation precision.

Key words: wideband signal; aperture fill time; Keystone transform; Direction Of Arrival estimation

在雷达、声呐、通信、勘探、天文以及医疗等领域, 波达方向(DOA)估计问题是一类重要的阵列信号处理问题。信号带宽的增大可以使信号携带更丰富的目标信息, 因此宽带信号越来越被广泛应用, 宽带 DOA 估计问题也成为宽带阵列信号处理领域的热点问题。当宽带信号对应的距离分辨率与宽带阵列孔径可比拟时, 宽带阵列所接收的空时二维信号在空频域上存在耦合, 即表现为宽带阵列所固有的孔径渡越效应^[1-2]。孔径渡越效应的存在影响着宽带 DOA 估计性能, 必须加以克服^[3-4]。

实时延迟线是传统的消除孔径渡越影响的硬件方法^[5], 如相控阵多功能成像雷达系统(Phased Array Multifunction Imaging Radar, PAMIR)^[6]。复杂的实时延迟线技术造成系统硬件成本过大及调整困难等问题。文献[7]提出利用二维数据进行空时处理方式消除孔径渡越对宽带阵列的影响。为提高系统抗干扰能力与分辨性能, 空时处理技术需要增大阵列阵元数及时域滤波器的阶数, 造成计算复杂度高且系统收敛速度低。聚焦处理技术是从时间频域出发解决孔径渡越效应影响的方法^[8-9], 其利用聚焦矩阵将不同频率子带数据投影到指定频率子带, 再利用窄带技术进行 DOA 估计。构造聚焦矩阵的方法有双边相关变换法^[10]、最小二乘的聚焦矩阵算法^[11]以及信号子空间变换算法等^[12], 这些方法都需要进行角度的预估计, 运算量较大^[13], 而且, 聚焦矩阵的误差将使系统性能显著下降^[14]。

收稿日期: 2012-09-06; 修回日期: 2012-10-23

基金项目: 中央高校科技基本科技业务费中国民航大学专项基金资助项目(ZXH2012H002); 天津市自然科学基金资助项目(09JCYBJC00600)

本文根据宽带阵列接收的二维空时数据在空频域存在线性耦合的特点,提出一种利用梯形变换^[15-17]使二维数据在空频域解耦的宽带 DOA 估计算法,该算法对二维数据解耦后,沿时间轴进行脉冲压缩,再用单个压缩后的空间快拍数据进行目标 DOA 估计。

1 信号模型

考虑宽带阵列天线为 M 元均匀线阵,相邻阵元间距为 d ,如图 1 所示。

假设处于阵列 θ_0 方向的目标辐射的宽带信号为:

$$d(t) = p_c(t) \exp \{j2\pi f_{0c} t\}, \quad t \in [-T/2, T/2] \quad (1)$$

式中: $p_c(t)$ 为宽带信号的包络; T 为宽带信号的脉宽; f_{0c} 为载波频率。则阵列第 $m(m=0,1,\dots,M-1)$ 阵元接收信号可表示为:

$$s_1(m,t) = ap_c(t - \tau_0 - m\tau_c) \exp \{j2\pi f_{0c}(t - \tau_0 - m\tau_c)\} + z_1(m,t) \quad (2)$$

式中: a 为信号经信道衰减后的复幅度; τ_0 为信号由目标到达阵列天线第 0 阵元的延迟; $\tau_c = d \sin \theta_0 / c$ 为信号在相邻阵元间的延迟差, c 为信号传播的速度; $z_1(m,t)$ 为第 m 阵元接收的方差为 σ^2 的零均值高斯白噪声。

由式(2)可见,第 0 阵元接收信号的包络为 $p_c(t - \tau_0)$,第 $M-1$ 阵元接收信号的包络为 $p_c[t - \tau_0 - (M-1)\tau_c]$,即两者之间存在相对延迟量 $(M-1)\tau_c$ 。对于窄带信号,该延迟量引起的包络变化可忽略,但对于宽带信号,该延迟量将引起较大的包络变化,使宽带阵列的单个快拍内各阵元接收信号的幅度不一致,影响阵列流形矢量,即为孔径渡越效应。孔径渡越效应的存在将影响系统 DOA 估计性能,必须采用有效技术克服孔径渡越效应对进一步信号处理的影响。

若以第 0 阵元为参考阵元,对各阵元接收信号乘以 $\exp \{-j2\pi f_{0c}(t - \tau_0)\}$ 进行去载波处理得:

$$s_2(m,t) = ap_c(t - \tau_0 - m\tau_c) \exp \{-j2\pi f_{0c} m\tau_c\} + z_2(m,t) \quad (3)$$

式中: $z_2(m,t)$ 为去载波处理后的噪声。以 T_s 为采样间隔对式(3)在时间上离散化,得:

$$s(m,n) = ap(n + \eta - m\tau) \exp \{-j2\pi f_0 m\tau\} + z(m,n) \quad (4)$$

式中: $n = -N/2, \dots, (N/2) - 1$, N 为宽带信号脉宽内沿时间向有效采样点数; $p(n) = p_c(nT_s)$; η 为 $(t - \tau_0)$ 量化后的残差, $0 \leq \eta < 1$, $f_0 = f_{0c} T_s$ 为数字化载波频率; $\tau = \tau_c / T_s$ 。

将式(4)沿时间向 Fourier 变换到频域得:

$$S(m,k) = aP(k) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{N} k(\eta - m\tau) - j2\pi f_0 m\tau \right\} + Z(m,k) \quad (5)$$

式中: $P(k)$ 为 $P(n)$ 的离散 Fourier 变换。式(5)指数多项式中存在 k 与 m 的乘积项,因此阵列信号 $s(m,n)$ 在空域与频域上存在线性耦合。

2 解耦技术

将式(5)整理得:

$$S(m,k) = aP(k) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{N} k\eta \right\} \exp \left\{ -j2\pi \left(\frac{k}{N} + f_0 \right) m\tau \right\} + Z(m,k) \quad (6)$$

令

$$m = \frac{f_0}{f_0 + (k/N)} u \quad (7)$$

代入式(6)得:

$$S(u,k) = aP(k) \exp \left\{ j \frac{2\pi}{N} k\eta \right\} \exp \{-j2\pi f_0 u\tau\} + Z(u,k) \quad (8)$$

式(8)乘以 $P^*(k)$, 并将其 Fourier 变换到时域得:

$$s(u,n) = aAq(n,\eta,N) \exp \{-j2\pi f_0 u\tau\} + z(u,n) \quad (9)$$

式中: A 为宽带信号 $p(t)$ 脉冲压缩后的最大幅度; 函数 $q(n,\eta,N)$ 为:

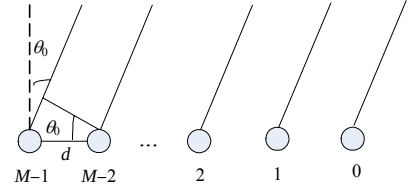


Fig.1 Wideband uniform linear array

图 1 宽带均匀线阵

$$q(n, \eta, N) = \exp \left\{ -j\pi(n-\eta)(N-1)/N \right\} \frac{\sin(\pi(n-\eta)/N)}{\sin(\pi(n-\eta)/N)} \quad (10)$$

将式(9)沿变换 u 逆 Fourier 变换到空域得:

$$S(h, n) = aAq(n, \eta, N)q(Mf_0\tau, h, M) + Z(h, n) \quad (11)$$

由此可见, 根据数据 $S(h, n)$ 的最大值位置即可获得 $\hat{\eta}$ 和 $\hat{\tau}$, 进而获得 DOA 估计 $\hat{\theta}_0$ 。

3 仿真实验

本部分将针对常用的宽带信号: 线性调频(Linear Frequency Modulated, LFM)信号和非线性调频(Nonlinear Frequency Modulated, NLFM)信号, 来验证本文算法的有效性。假设线性调频信号与非线性调频信号对应于式(1)中的包络信号分别为:

$$\begin{cases} p_{\text{cl}}(t) = \exp \{ j\pi\gamma t^2 \}, & t \in [-T/2, T/2] \\ p_{\text{cn}}(t) = \exp \left\{ j\pi B T \sin \left(\pi \frac{t+T/2}{T} \right) \right\}, & t \in [-T/2, T/2] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\gamma = 2 \times 10^{13}$ Hz/s 为线性调频信号的调频斜率; $T = 10 \mu\text{s}$, 线性调频信号的带宽为 200 MHz; B 为非线性调频信号的带宽, 为与线性调频信号情况进行对比, 将非线性调频信号的带宽 B 也设定为 200 MHz。

实验中阵列采用 $M=64$ 元均匀线阵, 阵元间隔为宽带信号载波的半波长, 宽带信号载波频率为 $f_0=500$ MHz。目标的 DOA 为 $\theta_0=30^\circ$, 系统采样间隔 $T_s=2$ ns。系统信噪比由式(2)的信号复幅度 a 和噪声的方差 σ^2 定义, $R_{\text{SN}} = a^2 / \sigma^2$ 。实验结果见图 2~图 3。

对比图 2(a)和图 3(a)可见, 在空时域上, 线性调频信号呈现为一条斜线, 而非线性调频信号则为一条曲线, 表明无论线性调频信号, 还是非线性调频信号, 随着时间的变化, 相应的方位频率均发生变化, 这与窄带信号的情况完全不同。将各自信号变换到空频域后, 两类信号均表现出在空频间存在线性耦合, 如图 2(b)和图 3(b)所示。经过梯形变换解耦处理后, 由图 2(c)和图 3(c)可见, 空频耦合已经基本消除, 可以沿频率方向进行简单的相干积累获得目标的 DOA 估计。

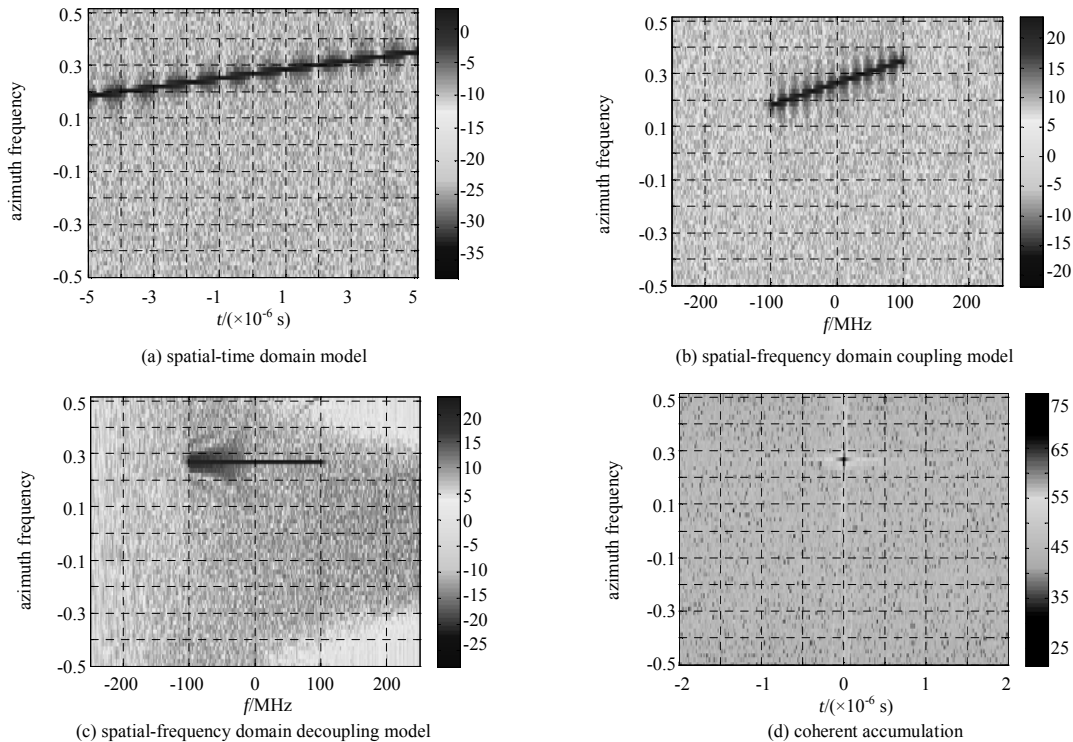


Fig.2 Decoupling processing of LFM signal

图 2 线性调频信号下的解耦处理

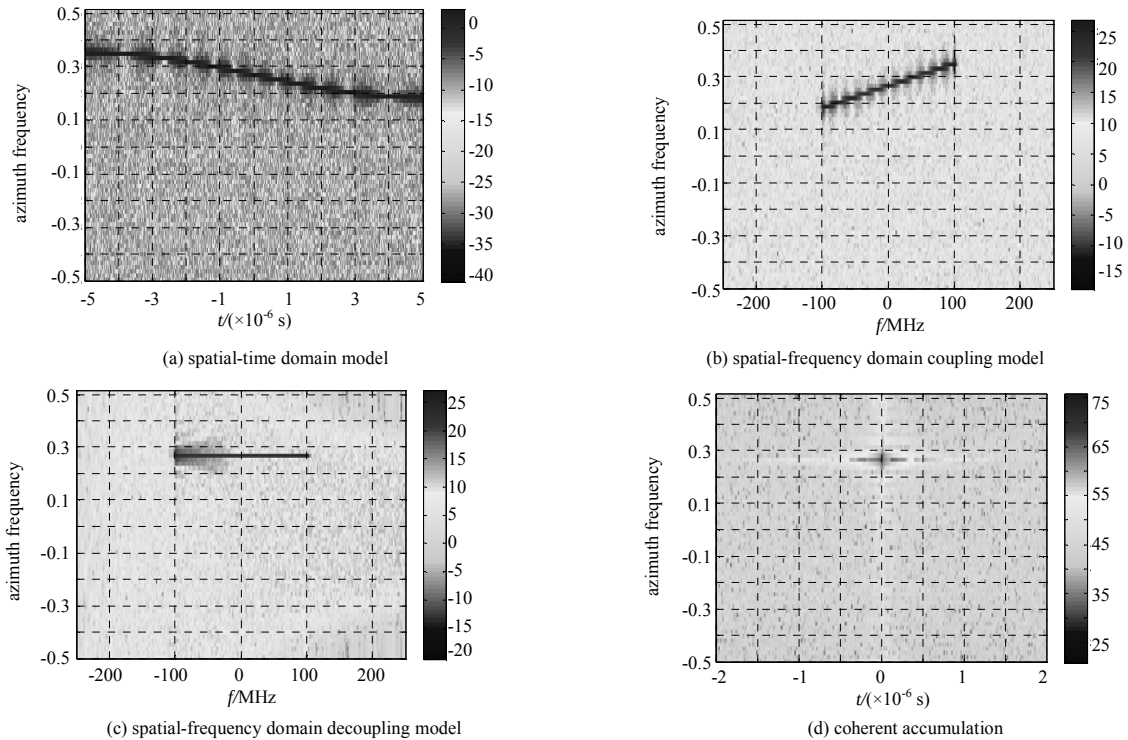


Fig.3 Decoupling processing of NLFM signal

图 3 非线性调频信号下的解耦处理

为了验证消除孔径渡越效应之后的宽带 DOA 估计精确度,对线性调频信号和非线性调频信号分别在信噪比范围为 $-45\text{ dB}\sim 33\text{ dB}$ 之间进行 100 次蒙特卡洛实验,实验结果见图 4~图 5。

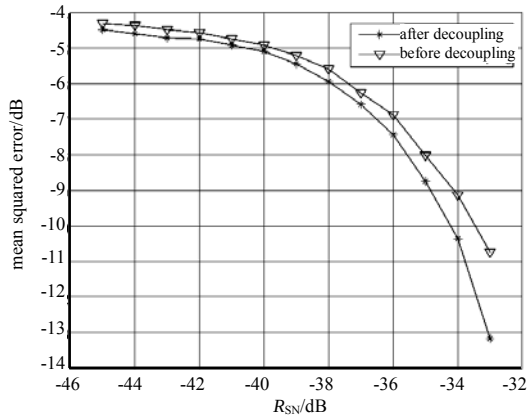


Fig.4 Decoupling results of LFM signal

图 4 线性调频信号的解耦前后精确度对比

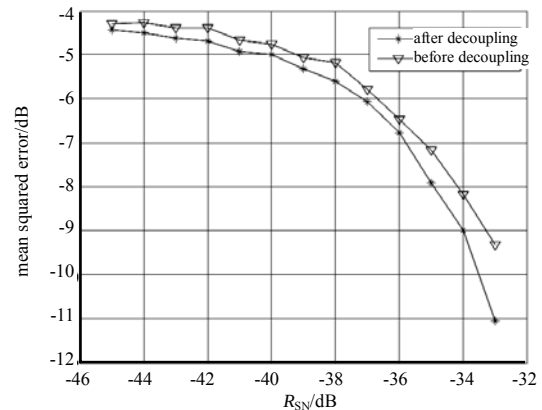


Fig.5 Decoupling results of NLFM signal

图 5 非线性调频信号的解耦前后精确度对比

由图 4 和图 5 中可以看出空频解耦之后的精确度要高于解耦之前,而且当信噪比较低时曲线很平稳,随着信噪比的逐渐增大,曲线迅速下降,且解耦后 DOA 估计精确度也明显提高。

4 结论

本文提出一种能够有效消除孔径渡越效应影响的宽带 DOA 估计算法,该算法根据宽带阵列接收的空时二维数据内在特点,应用梯形变换消除由于孔径渡越造成的数据空域与频域间的线性耦合问题,并进一步采用脉冲压缩和常规窄带 DOA 估计技术实现对宽带 DOA 估计。本文算法经过在时间轴的脉冲压缩可以提高信噪比,并且仅利用单个空间快拍即可实现 DOA 估计,与常规二维算法相比,降低了算法复杂度,提高了估计精确度。

参考文献:

- [1] 仇光锋,朱力. 宽带相控阵雷达孔径渡越现象研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010,5(4):354-359. (QIU Guangfeng, ZHU Li. Research on Aperture Fill Phenomena of Wideband Phased Array Radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2010,5(4):354-359.)
- [2] 文树梁,袁起,毛二可,等. 宽带相控阵雷达 Stretch 处理孔径渡越时间数字补偿技术[J]. 电子学报, 2005,33(6):961-964. (WEN Shuliang, YUAN Qi, MAO Erke, et al. Digital Compensation Technique of Aperture Fill Time for Wideband Phased Array Radar Stretch Processing[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33(6):961-964.)
- [3] 周伟光,王建明,谢纪岭,等. 一种孔径渡越时间补偿方法研究[J]. 现代雷达, 2011,33(1):41-46. (ZHOU Weiguang, WANG Jianming, XIE Jiling, et al. A Study on Compensation Method of the Aperture Fill Time[J]. Modern Radar, 2011,33(1):41-46.)
- [4] WANG Jun, CAI Duoduo, LEI Peng. Aperture effect influence and analysis of stepped frequency wideband phased array radar[C]// 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu:[s.n.], 2001:1444-1447.
- [5] Mailloux R J. Phased Array Antenna Handbook[M]. 2nd ed. Boston:Artech House, 2005.
- [6] Wilden H, Saalman O, Poppelreuter B, et al. A radar frontend with time steered array antenna for PAMIR[C]// 2007 European Radar Conference. Munich:[s.n.], 2007:202-205.
- [7] Qian Bin, Yang Wanlin, Wan Qun. Joint DOA and Time Delay Estimation Method for Space-time Coherent Distributed Signals Based on Search[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007,18(2):341-346.
- [8] 望永塔,徐向东,王党卫. 一种改进的宽带 DOA 估计算法[J]. 空军雷达学院学报, 2012,26(1):4-7. (WANG Yongta, XU Xiangdong, WANG Dangwei. Modified Estimation Algorithm for Wideband DOA[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012,26(1):4-7.)
- [9] Li Jian, Compton R T. Maximum Likelihood Angle Estimation for Signals with Known Waveforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(9):2850-2862.
- [10] Valaee S, Kaba P. Wideband Array Processing Using a Two-sided Correlation Transformation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995,43(1):160-172.
- [11] 熊波,曾鑫,秦明. 基于最小二乘聚焦矩阵的宽带信号 DOA 估计[J]. 海军航空工程学院学报, 2011,26(6):667-669. (XIONG Bo, ZENG Xin, QIN Ming. DOA Estimation of Wide-Band Signal with Frequency Focus Matrix Based on Least Square Method[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2011,26(6):667-669.)
- [12] Doron M A, Weiss A J. On Focusing Matrices for Wide-band Array Processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992,40(6):1295-1302.
- [13] ZHAO Jianjun, LI Xin, JIN Yong, et al. Performance Analysis of Coherent Subspace Methods for Direction of Arrival estimation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010,29(2):69-71.
- [14] WANG Juan, FENG Qing, WU Renbiao, et al. A Constant-beamwidth Beamforming Method for Acoustic Imaging[C]// 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Honolulu, HI:[s.n.], 2007:4236-4239.
- [15] WANG Yu, QIN Zhongyu, WEN Shuliang. Analysis of the Effect of the Aperture Fill Time in a Wideband Phase Array Radar on the Performance of One-Dimensional Range Profile[J]. Systems Engineer and Electronics, 2003,25(9):1072-1074.)
- [16] CHEN Wenchi, BAO Zheng, XING Mengdao. Keystone Transformation Based ISAR Imaging at the Low SNR Level[J]. Journal of Xidian University, 2003,30(2):155-159.)
- [17] CHEN Wenchi, XING Mengdao. An ISAR Imaging Algorithm for Multiple Targets Based on Keystone Transformation[J]. Modern Radar, 2005,27(3):40-43.

作者简介:



苏志刚(1972-), 男, 哈尔滨市人, 教授, 主要研究方向为阵列信号处理及其在雷达、通信和导航中的应用. email:ssrsu @vip.sina.com.

温 宙(1986-), 男, 河北省邯郸市人, 在读硕士研究生, 研究方向为宽带阵列信号处理.

吴仁彪(1966-), 男, 武汉市人, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为自适应信号处理, 高分辨率雷达成像与自动目标识别, 无线电干扰检测与自适应抑制, 民航遥感信息处理与应用.

刘海涛(1966-), 男, 河北省深州市人, 博士, 副教授, IEEE 会员, 主要研究方向为陆地、航空移动通信系统.