



中国科学院
电子学研究所,
北京, 100080

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

无相位检测电磁逆散射的CSI方法

李廉林 李芳

[*lilianlin9295@sohu.com*](mailto:lilianlin9295@sohu.com)

[*fli@mail.ie.ac.cn*](mailto:fli@mail.ie.ac.cn)

2007. 9. 19



中国科学院

电子学研究所,

北京, 100080

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

内容提要

1. 研究背景
2. 标准CSI方法
3. 无相位检测的CSI方法(PD-CSI)
4. 工作展望



中国科学院

电子学研究所，

北京，100080

2007

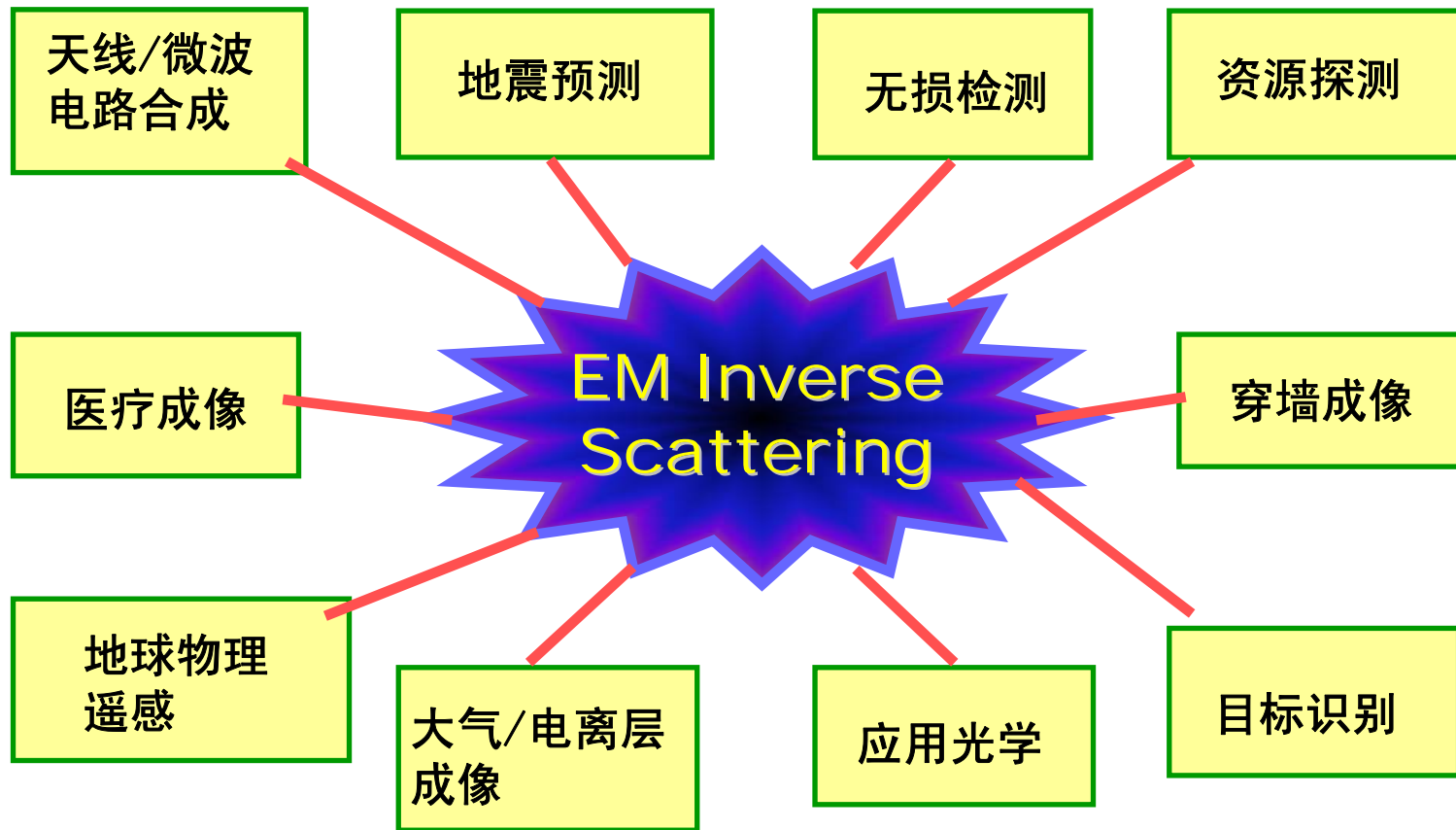
全国第九届
电波传播学
术讨论年会

一、研究背景

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

电磁逆散射应用领域





中国科学院

电子学研究所

北京, 100080

电 磁
散 射

已知: 目标特性, 激励情况等。

未知: 散射特性

电磁逆散射

已知: 散射特性, 激励情况等。

未知: 目标特性

电 磁
散 射
逆

2007

数值算法

MoM, FDTD, FEM/FBM

CGFFT, FMM, MLFMM, PTD

近似估计

PO/GTD, Born/Rytov

ExBorn LQ/LA

局部方法

Newton, CG, SDP, N-K

全局方法

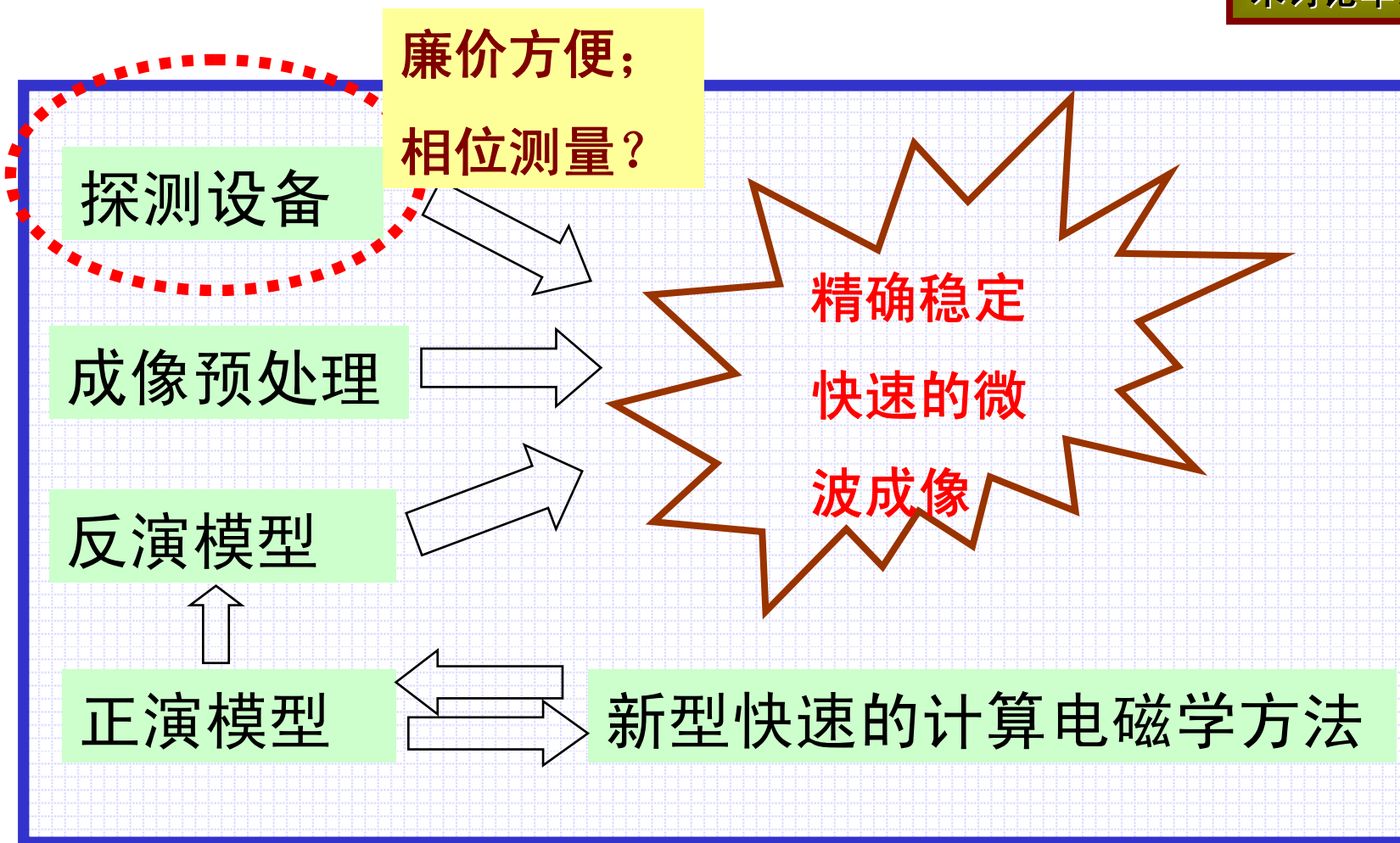
GA/PSO/SA/ASO

统计方法

SVM/Bayes

混合方法

电磁逆散射研究焦点



典型的反演模型及方法

◆ 直接法

逆时+子空间分解

线形抽样

◆ 迭代法

大尺度模型: CT方法

弱散射模型: 衍射成像

中等散射强度模型:

高阶Born/扩展Born/准线性近似

任意散射强度模型:

Contrast Source
Inversion

局部迭代方法 (Newton/CSI)

遗传算法 (基因/PSO/蚁群/模拟退火)

统计理论方法 (Bayes方法/支持向量机方法)

混合方法

无相位检测 电磁逆散射研究

- $f > 10\text{GHz}$, THz成像等;
(昂贵的硬件测量成本, 微波波段)
- 硬件设备与回波之间的耦合;
- 各种噪声对相位的影响&相位对成像的影响;
- 系统的稳定性对相位测量的影响。

已发展的无相位成像的方法

单步法

(Takenaka1997, Caorsi2003, Franceschini2006,
Belkebir2006 et al)

两步法

(Maleki1993, Crocco2006 et al)

解析估计

(Gur2001, Anastasio 2006)



中国科学院

电子学研究所,

北京, 100080

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

二、标准CSI方法

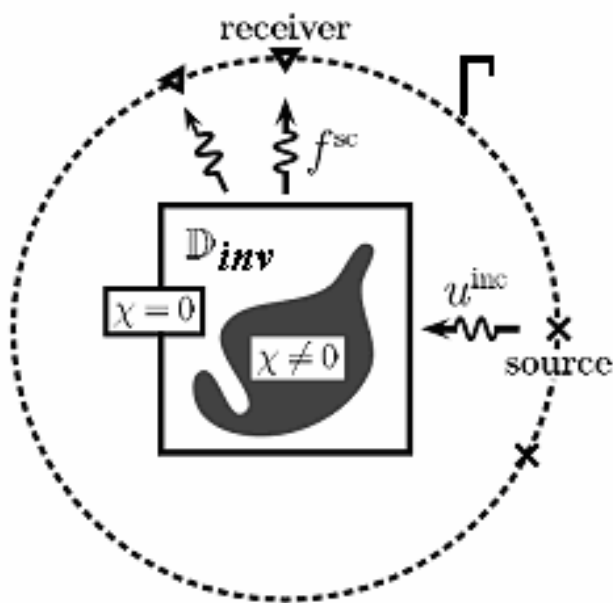
CSI方法概况

- Kleinman和van den Berg (1992),
Modified Gradient Method, MGM
- Kleiman和van den Berg (1995) TV-MGM
- Kleinman和van den Berg (1997),
结合Habashy (1994)提出的源积分方程, 提出了CSI
- Kleinman和van den Berg (1997), W-CSI
- van den Berg和A. Abubakar (1999), E-CSI
- van den Berg和A. Abubakar (2001), MR-CSI

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

CSI方法基本原理



结构示意图

数据方程

$$f_j^{meas}(\bar{r}) = k_b^2 \int_{D_{inv}} G(\bar{r}, \bar{r}') \chi(\bar{r}') u_j(\bar{r}') d^2 \bar{r}'$$

$$\bar{r} \in \Gamma$$

状态方程

$$u_j(\bar{r}) = u_j^{inc}(\bar{r}) + k_b^2 \int_{D_{inv}} G(\bar{r}, \bar{r}') \chi(\bar{r}') u_j(\bar{r}') d^2 \bar{r}'$$

$$\bar{r} \in D_{inv}$$

对比源

$$w_j(\bar{r}') = \chi(\bar{r}') u_j(\bar{r}')$$

$$f_j^{meas}(\bar{r}) = \bar{\bar{G}}_D w_j$$

$$w_j = \chi u_j^{inc} + \chi \bar{\bar{G}}_S w_j$$

线性逆问题 ?

$$w_j = \left(w_j \right)^{RAD} + \left(w_j \right)^{NR}$$

零测度空间

价格函数

$$F = \eta_D F_D(\bar{w}) + \beta \eta_S F_S(\bar{w}, \bar{\chi}) + \text{TV项}$$

状态方程的失配

$$F_D(\bar{w}) = \sum_j \left\| f_j^{meas} - \bar{G}_D w_j \right\|_{\Gamma}^2 \quad \eta_D = \left(\sum_j \left\| f_j^{meas} \right\|_{\Gamma}^2 \right)^{-1}$$

$$F_S(\bar{w}) = \sum_j \left\| \chi u_j^{inc} + \chi \bar{G}_S w_j - w_j \right\|_{inv}^2 \quad \eta_S = \left(\sum_j \left\| \chi u_j^{inc} \right\|_{inv}^2 \right)^{-1}$$

1
2

TV-正则化项

$$F_n^{TV}(\chi) = \frac{\int_{inv} \left(|\nabla \chi|^2 + \delta_{n-1}^2 \right)^{p/2} dv}{\int_{inv} \left(|\nabla \chi_{n-1}|^2 + \delta_{n-1}^2 \right)^{p/2} dv}$$

$$F_n^{TV}(\chi) = \frac{1}{V} \int_{inv} \frac{|\nabla \chi|^2 + \delta_{n-1}^2}{|\nabla \chi_{n-1}|^2 + \delta_{n-1}^2} dv$$

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

TV-CS I

MR-CS I



中国科学院

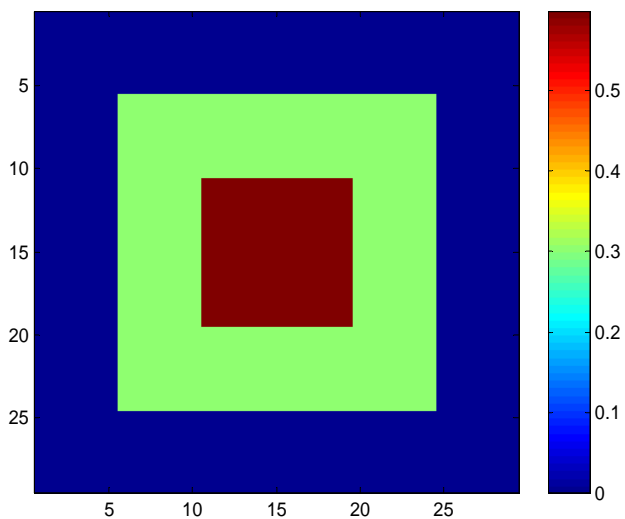
电子学研究所

北京, 100080

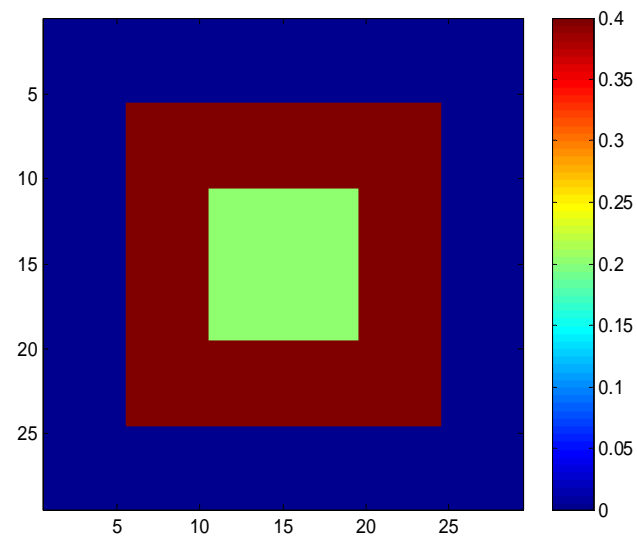
2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

数值例子



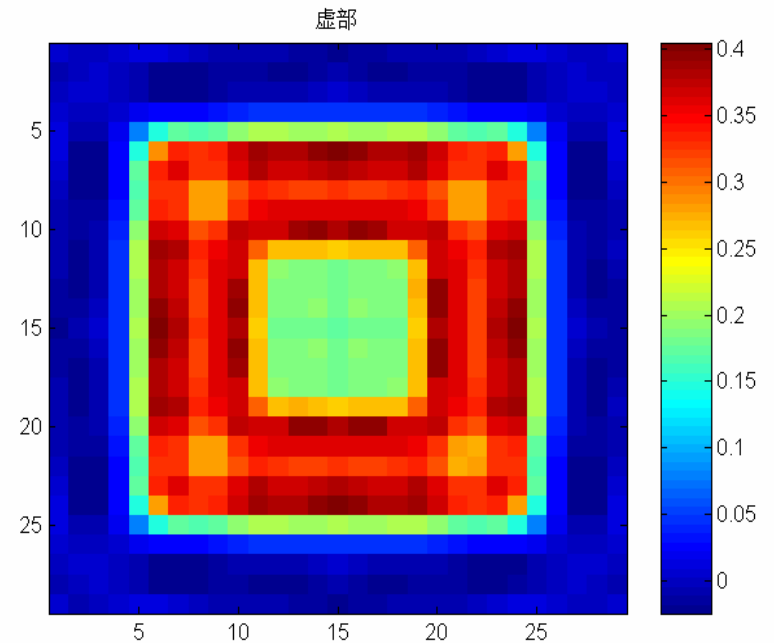
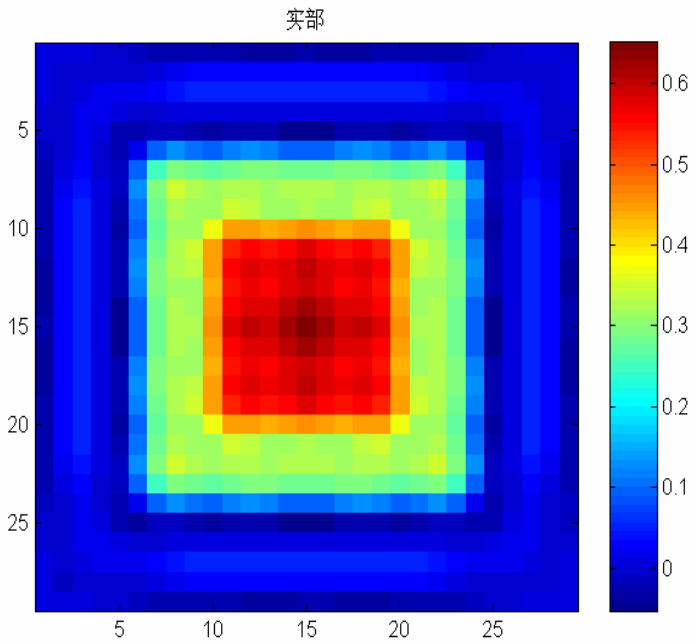
实部



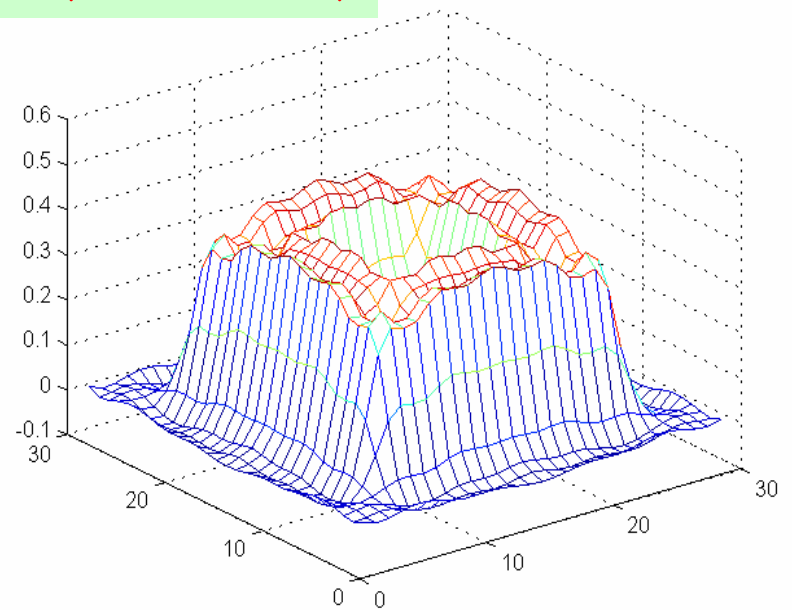
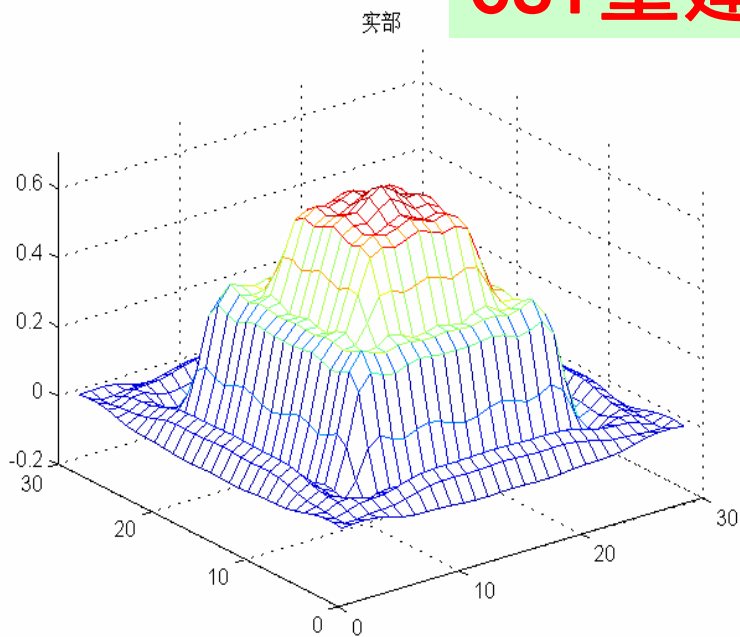
虚部



中国科学院
电子学研究所，北京，100080



CSI重建结果 (500MHz)

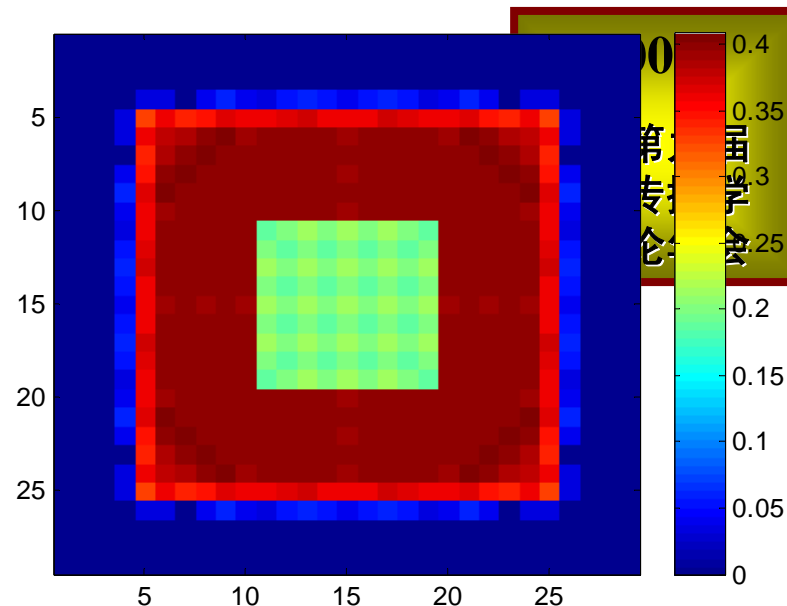
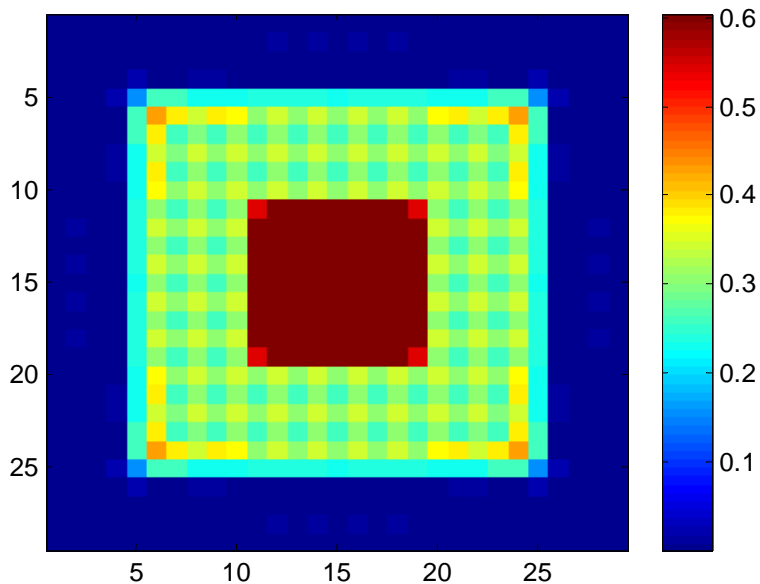




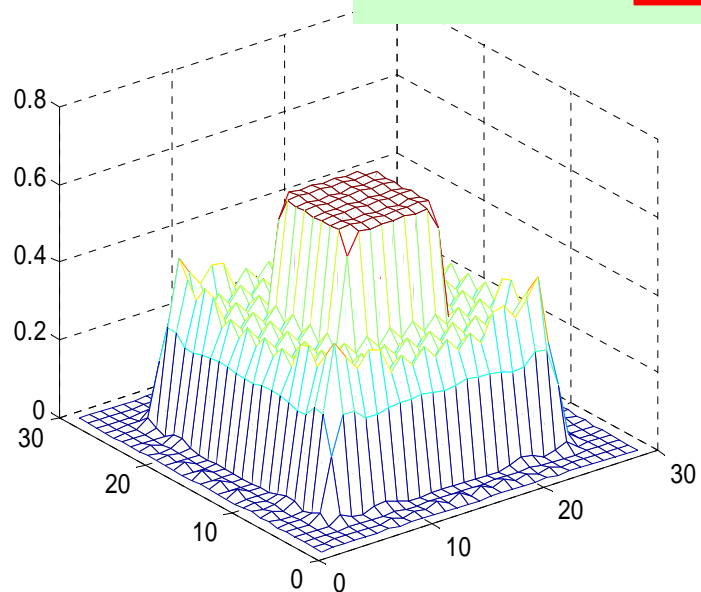
中国科学院

电子学研究所

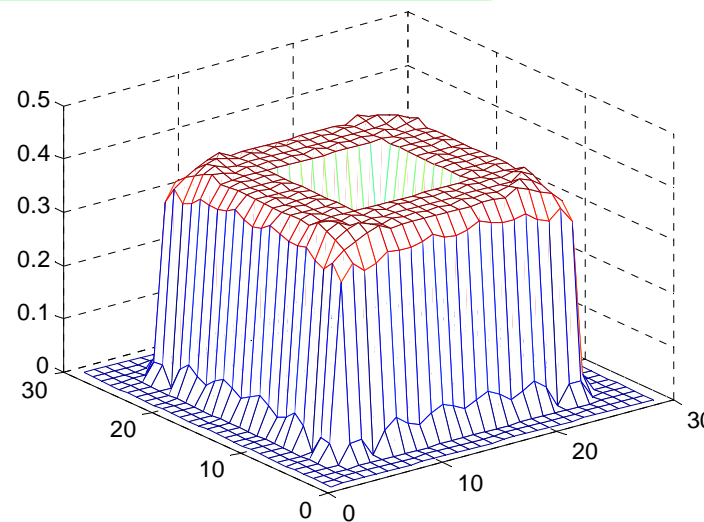
北京, 100080



MR-CSI 重建结果 (500MHz)

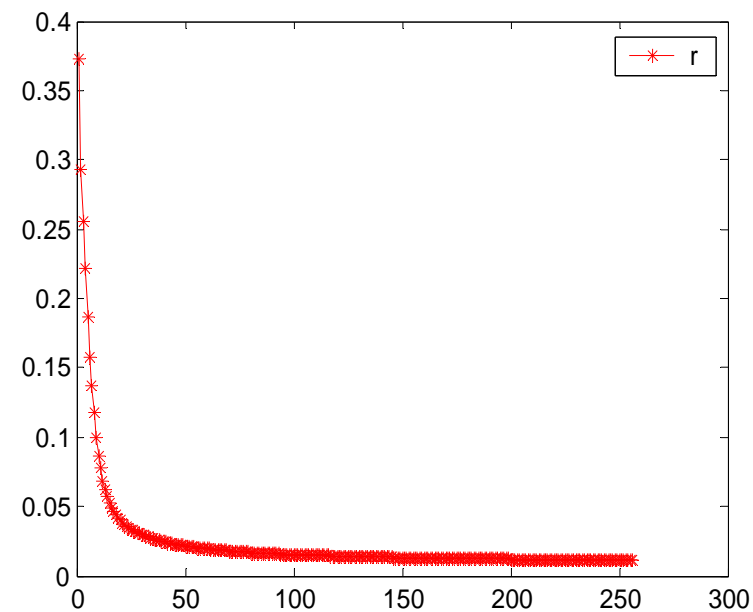
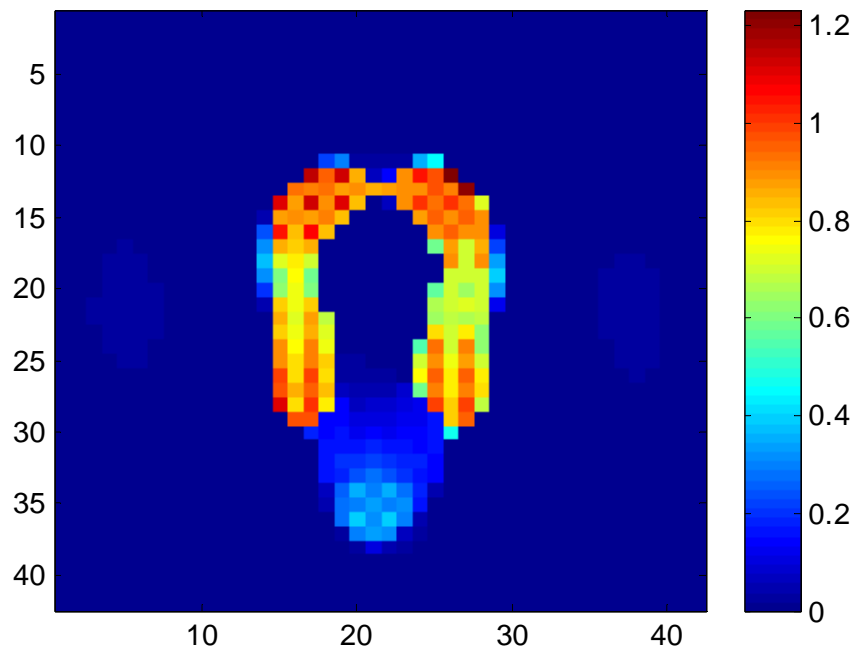
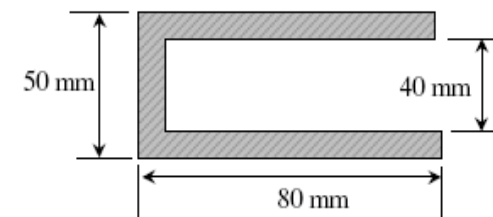


实部



虚部

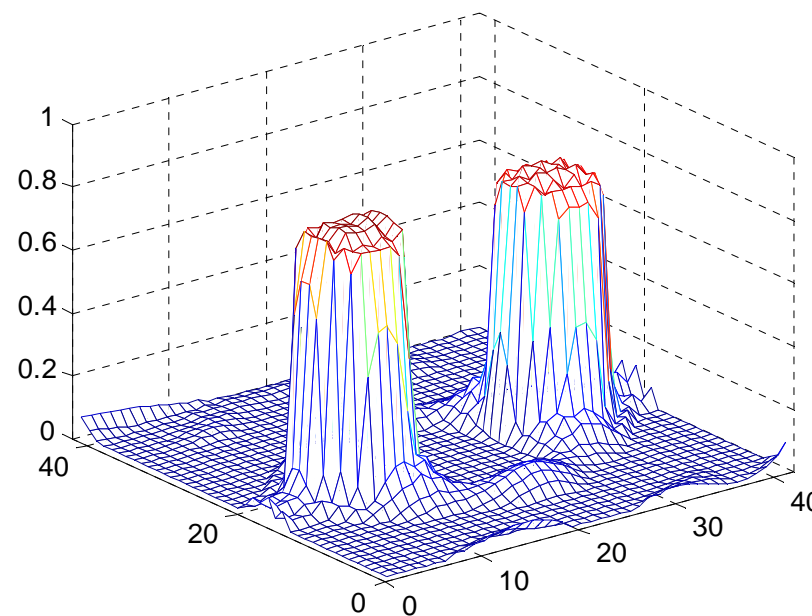
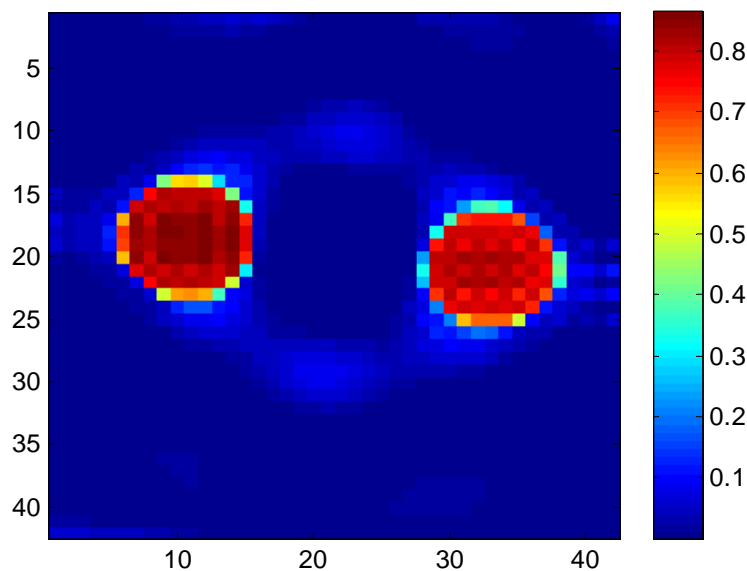
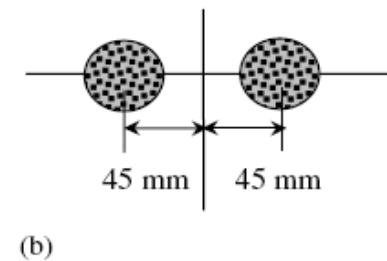
实验验证 CSI (4GHz)



收敛曲线

金属U型槽

实验验证 MR-CSI (4GHz)



半径为15毫米的介质圆柱，相对介电常数为3 ($\epsilon_{rr}=0.3$)



中国科学院

电子学研究所,

北京, 100080

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

三、PD-CSI方法

PD-CSI 方法原理

数据方程

$$\bar{M}_j^2 = (\bar{f}_{d,R}^j)^2 + (\bar{f}_{d,I}^j)^2$$

$$\bar{f}_{d,R}^j = \bar{G}_{D,R} \bar{W}_{s,R}^j - \bar{G}_{D,I} \bar{W}_{s,I}^j + \bar{u}_{inc,d,R}^j$$

$$\bar{f}_{d,I}^j = \bar{G}_{D,R} \bar{W}_{s,I}^j + \bar{G}_{D,I} \bar{W}_{s,R}^j + \bar{u}_{inc,d,I}^j$$

$$\bar{f}_d^j = \bar{G}_D \bar{W}_s^j + \bar{u}_{inc,d}^j$$

价格函数

$$F = F_D(\bar{w}) + F_S(\bar{w}, \bar{\chi})$$

与CSI相同

未知参
量不变

$$F_D(\bar{w}) = \eta_D \sum_j \left\| \bar{M}_j^2 - (\bar{f}_{d,R}^j)^2 - (\bar{f}_{d,I}^j)^2 \right\|^2$$

$$F_S(\bar{w}, \bar{\chi}) = \eta_S \sum_j \left\| \bar{\chi}_s \odot \bar{u}_{inc,s}^j - \bar{w}_s^j \right. \\ \left. + \bar{\chi}_s \odot (\bar{G}_S \bar{w}_s^j) \right\|^2$$

$$\eta_S = \left(\sum_j \left\| \bar{\chi}_s \odot \bar{u}_{inc,s}^j \right\|^2 \right)^{-1} \quad \eta_D = \left(\sum_j \left\| \bar{M}_j^2 \right\|^2 \right)^{-1}$$

Fletcher导数

$$\bar{g}_{S,\bar{w}} = -\eta_S \left[\bar{r}_j - \left(\bar{G}_S \right)^H \left(\bar{r}_j \odot \bar{\chi}_s^* \right) \right]$$

$$\bar{g}_{D,\bar{w}} = 2\eta_D \left[\bar{f}_d^j \odot \left(\bar{G}_D \right)^* \right]^T \left[\left(\bar{f}_{d,R}^j \right)^2 + \left(\bar{f}_{d,I}^j \right)^2 - \bar{M}_j^2 \right]$$

最佳步长

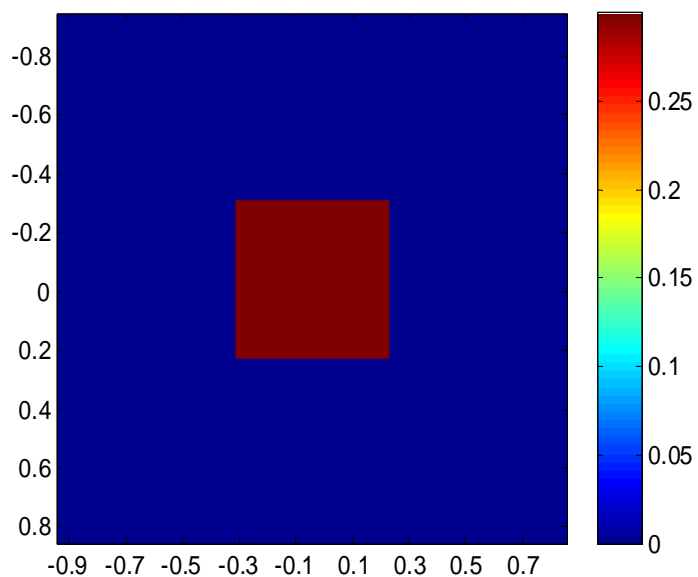
$$\alpha = \arg \min_{\text{real } \alpha} \left\{ F \left(\bar{w}_{s0}^j + \alpha \bar{d}_s^j \right) \right\}$$

$$= \arg \min_{\text{real } \alpha} \left\{ \eta_D \sum_{i=0}^4 A_i \alpha^i + \eta_S \sum_{i=0}^2 B_i \alpha^i \right\}$$

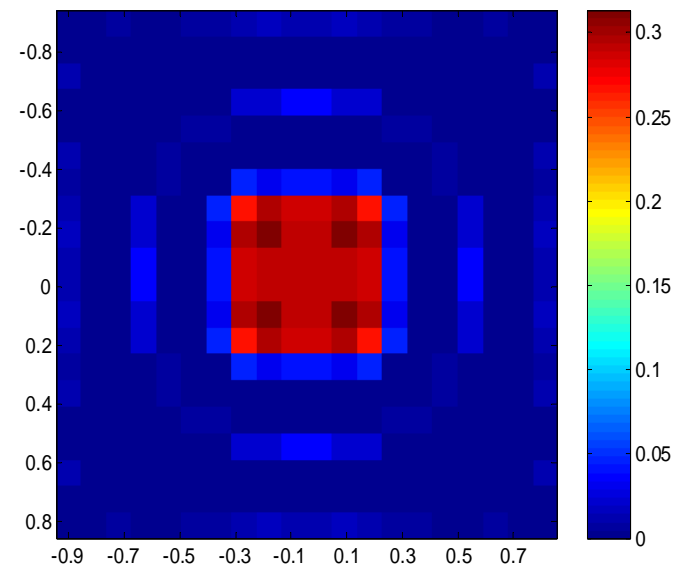
求解三次多项式
的根即可获得!!!

PD-CSI 重建结果 (400MHz)

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

精确



重建

PDCSI 无耗目标例子; SNR, 30dB



中国科学院

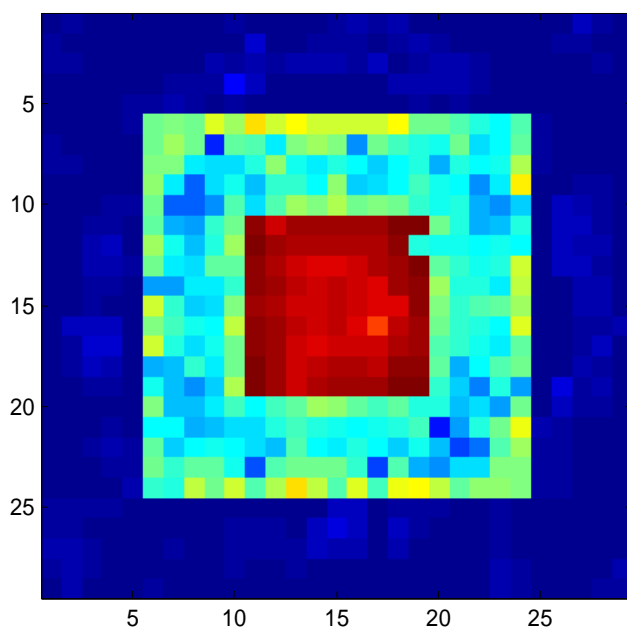
电子学研究所

北京, 100080

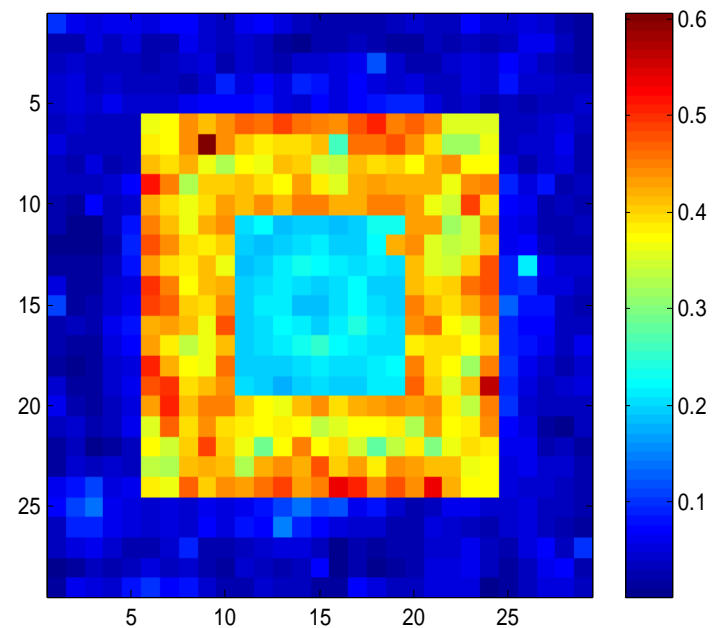
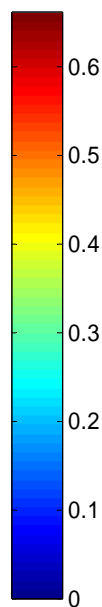
PD-CSI 重建结果 (500MHz)

2007

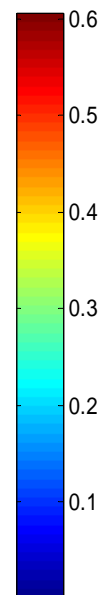
全国第九届
电波传播学
术讨论年会



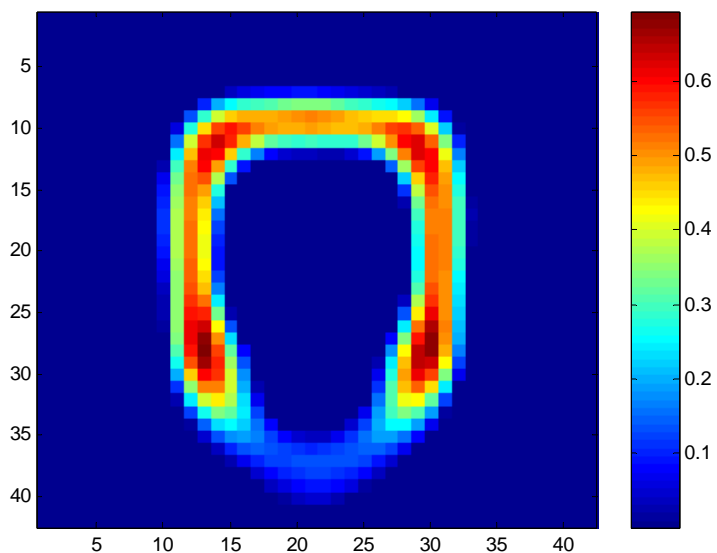
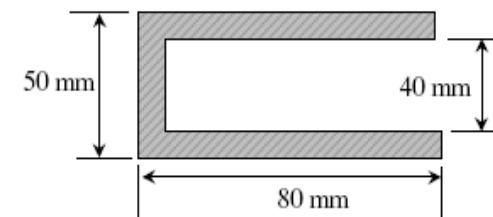
实部



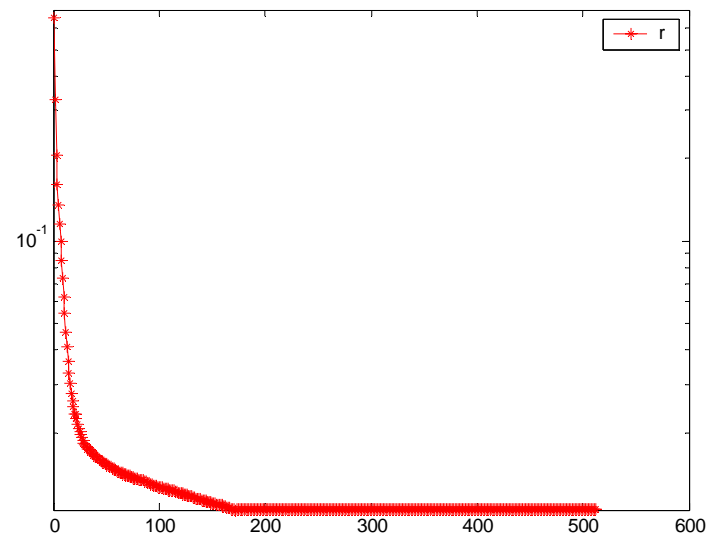
虚部



实验验证 PD-CSI (4GHz)



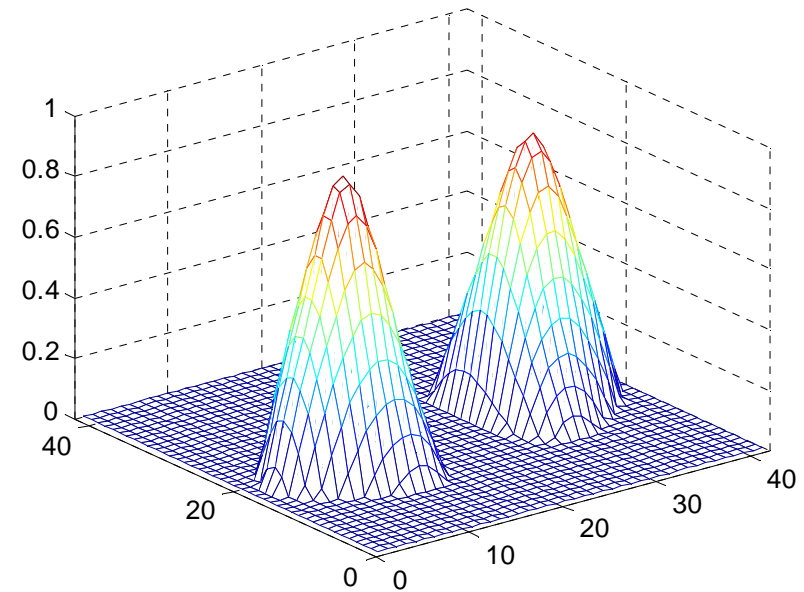
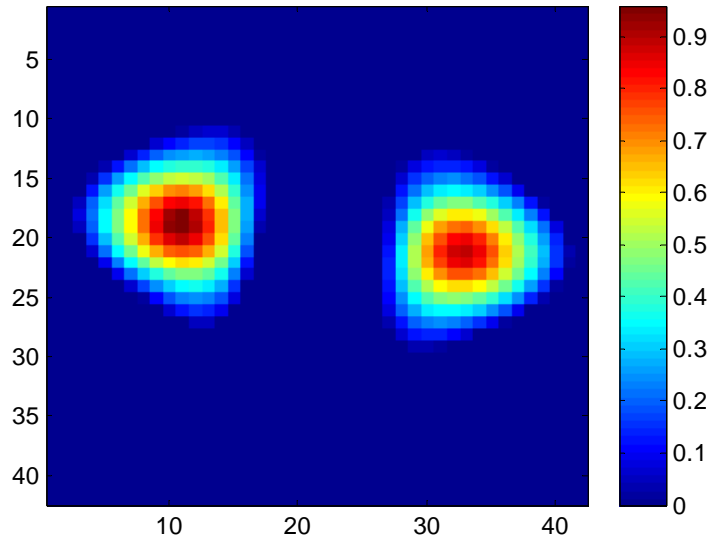
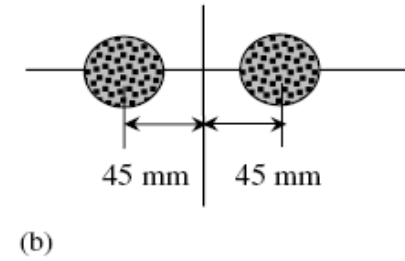
重建结果



收敛曲线

金属U型槽

实验验证 PD-CSI (4GHz)

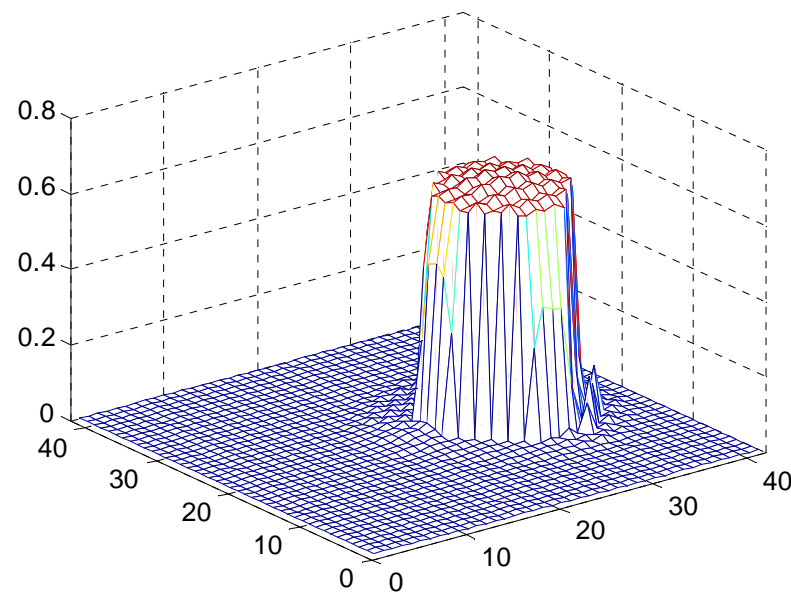
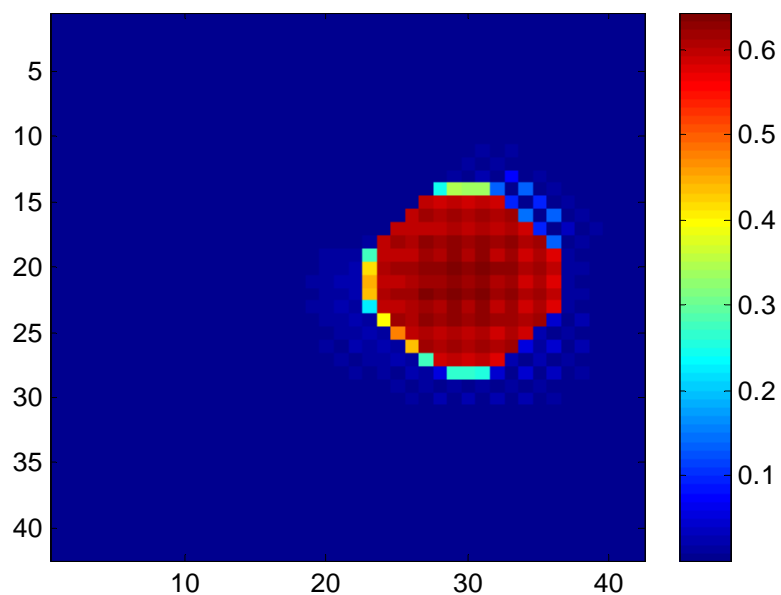
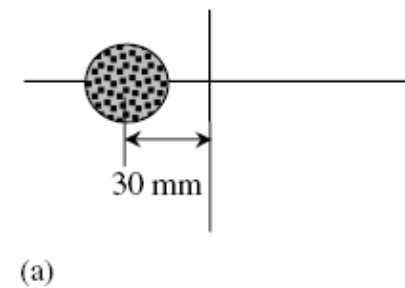


半径为15毫米的介质圆柱，相对介电常数为3 ($\epsilon_{rr}=0.3$)

讨论

- 具有与全息CSI几乎相同的计算流程和算法特点, (特别地, 未知参量相同, 对比度函数的更新相同, 对比源的更新方向和更新步长可解析获得);
- 相对全息CSI, 具有更多的未知数;
- 收敛速度较慢.

实验验证 PD-MRCSI (4GHz)



半径为15毫米的介质圆柱, 相对介电常数为3 ($\text{err}=0.3$)

四、工作展望

- “PD-CSI”+TV正则化，改善成像效果
- “PD-CSI”+多尺度(多频)策略，避免局部最小值
- 未知函数在合适的函数空间展开，避免局部最小值
- 复杂背景中(分层等)的应用



中国科学院

电子学研究所,

北京, 100080

2007

全国第九届
电波传播学
术讨论年会

**谢谢关注,
欢迎提问!**