

文章编号:1004-9037(2014)04-0533-09

MIMO-SAR 回波分离方法分析

禹卫东 李红霞

(中国科学院电子学研究所,北京,100190)

摘要: MIMO-SAR (Multiple input multiple output synthetic aperture radar) 是近年来提出的一种新的 SAR 体制。通过多个发射天线和接收天线的组合,可以形成更多等效相位中心,提高系统自由度,进一步扩展 SAR 的模式,提高其性能。但是, SAR 回波对应分布场景,匹配滤波后互相关噪声叠加,相互干扰造成图像下降,通常 MIMO 雷达中正交波形分集方法在 MIMO-SAR 体制中是无效的。因此,回波分离成为 MIMO-SAR 实现的关键问题。本文介绍了 MIMO-SAR 的工作原理及其应用,对目前已有的回波分离方法进行分析,指出其原理和约束条件,最后针对回波分离问题,探讨了一些新的解决方法。

关键词: 多发多收合成孔径雷达;回波分离;分布场景;正交波形

中图分类号: TN959.3

文献标识码: A

Analysis of Echo Separation in MIMO-SAR

Yu Weidong, Li Hongxia

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China)

Abstract: MIMO-SAR (multiple input multiple output synthetic aperture radar) is a new kind of SAR system, which combines multiple transmitters and multiple receivers to acquire more equivalent phase centers and more degrees of freedom. By this way, MIMO-SAR extends system working mode and improves the performance. However, SAR echo is scattered from a distributed scene. Cross-correlation noise will overlap and interferences will degrade the image. That will make the separation methods used in MIMO radar fail in MIMO-SAR. Therefore, separation is a key problem to the implementation of MIMO-SAR. This paper introduces the principle of MIMO-SAR and its applications, then reviews the methods proposed in current literatures. The principles and constrains of every separation method are pointed out. Some new approaches to the problem are proposed and discussed.

Key words: MIMO-SAR; echo separation; distributed scene; orthogonal waveform

引 言

多发多收 (Multiple input multiple output, MIMO) 雷达具有多个发射机和多个接收机,可以构成多种发射和接收组合,显著提高雷达探测能力。将 MIMO 体制用于合成孔径雷达 (SAR) 中,并与方位多波束和数字波束形成 (DBF) 技术结合,可以形成更多等效相位中心,对于 SAR 高分辨率宽测绘带、SAR-GMTI 以及各种先进 SAR 模式的实现具有重要意义。

在 MIMO-SAR 中,对应各发射机的目标回波是重合在一起返回的,必须在接收端进行信号分离,才能形成所需的发射、接收等效中心;但对于 SAR 分布场景,不论发射采用什么样的波形分集,回波的积分能量都是恒定的,使得针对点目标的“正交波形分集+匹配滤波”分离方法无效。不同发射对应的回波存在互相关干扰,致使最终得到的 SAR 图像信杂比严重恶化。

1 MIMO-SAR 工作原理及其发展

MIMO-SAR 采用多副发射天线和接天线同

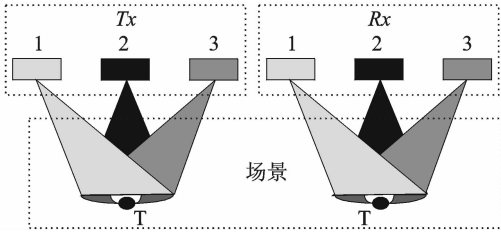


图 1 MIMO SAR 收发天线构成示意

Fig. 1 Illustration of MIMO SAR

时工作的方式,提高 SAR 获取的信息量。如图 1 所示,3 个发射天线 T_x 同时照射场景,3 个接收天线 R_x 同时接收场景的回波。

多发多收的概念最早出现在无线通信领域^[1-3],通过多个天线独立发射信号,克服单个信道引起的衰落效应。

Eran Fishler 等人于 2004 年将 MIMO 的概念引入雷达中^[4],认为 MIMO 技术可有效解决目标闪烁造成雷达探测性能下降的问题,他们提出采用分置的多个发射机去照射目标,

如图 2 所示。当发射机间距大于目标散射波束宽度时,与传统的阵列雷达相比,MIMO 可以获得空间分集的增益,克服目标闪烁造成的误差,使测量均方误差达到 Cramer-Rao 界。

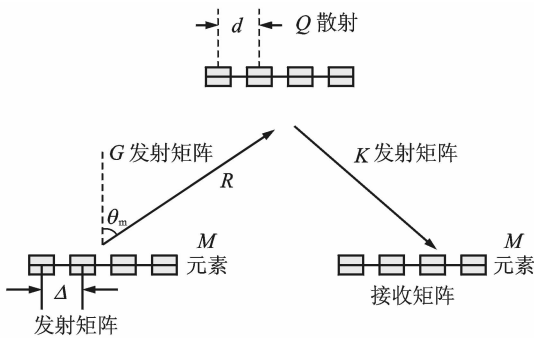


图 2 Fishler 等人提出的 MIMO 雷达

Fig. 2 MIMO radar proposed by Fishler

德国 FGAN 的 Ender 于 2007 年在国际上最早提出 MIMO-SAR 概念^[5,6],利用多发多收的组合,形成更多的等效相位中心(收发天线的中间位置),可以在较少发射天线和接收天线配置数量下,合成一个虚拟大阵列。并据此设计了装载于无人机平台的 ARTINO(Airborne radar for three dimensional imaging and nadir observation)系统,用 MIMO 阵列实现了下视三维成像。

德国 DLR 的 Krieger 于 2008 年提出了多维

波形编码的 SAR 体制^[7]。在 SAR 发射天线的不同子阵上采用不同的波形,也包含了 MIMO 的思想。通过这种方式,可以实现更加灵活的综合性 SAR 体制以及更高的性能指标。

Kim 等人^[8]提出 OFDM LFM(Linear frequency modulation)波形用于 MIMO-SAR 中,给出了波形产生及处理方法,并将其用于极化 SAR 系统设计中^[9]。通过 MIMO 技术可以在一个脉冲周期内发射两种极化信号,避免了传统体制下时分交替极化引起的测绘带幅宽减半问题。

Wang^[10]也提出将 LFM 子串构成的 OFDM 波形用于 MIMO-SAR 中,并将 OFDM 波与空时编码相结合^[11]。齐维孔和禹卫东等^[12,13]提出了 MIMO 与数字波束形成(Digital beam forming, DBF)结合的星载 SAR 系统体制。孟藏珍等^[14]提出了基于 Clean 处理的 MIMO-SAR 正交波形分离方法。

目前国内外对 MIMO-SAR 的研究尚处于初步阶段,对于 MIMO-SAR 回波分离方法的研究也涉及不多,其有效性还远未得到充分验证,还存在一些需要澄清的概念,比如正交波形分离对于分布场景情况下的有效性等。

2 MIMO-SAR 的优势及其应用

作为全天候、全天时的微波成像遥感手段,SAR 近年来得到广泛的应用。目前星载 SAR 高分辨率宽测绘带成像和 GMTI(Ground moving target indication)的需求最为迫切,而通过 MIMO SAR 技术,可以有效提升星载 SAR 高分宽测和 GMTI 的性能指标。另外,MIMO SAR 还可以实现距离向超分辨率和改进极化 SAR 系统的性能。

2.1 SAR 高分辨率宽测绘带成像

根据 SAR 工作原理,脉冲重复频率(Pulse repetition frequency, PRF)必须大于方位向回波的多普勒带宽,同时脉冲重复周期($PRT=1/PRF$)必须大于测绘带回波窗口时间。在高分宽测情况下,高分辨率需要大的多普勒带宽,因此要求高 PRF;而宽测绘带需要大的脉冲重复周期,因此要求低 PRF。高分辨率和宽测绘带对 PRF 的要求相互矛盾,使得传统 SAR 体制无法同时实现高分辨率和宽测绘带。测绘带幅宽(单位:km)与分辨率(单位:m)的比值一般只能达到 10 左右,即 1 m 分辨率条件下,测绘带幅宽约为 10 km;10 m 分辨率条件

下,测绘带幅宽约为 100 km。为了满足 SAR 高分宽测的需求,目前多采用方位向多相位中心技术。

方位多相位中心技术将天线分为多个子阵,通过发射和接收的不同组合,形成多个等效相位中心。在 SAR 平台运动过程中,通过空间采样来等效时间采样,降低系统工作的 PRF,从而获得宽测绘带。目前的方位向多相位中心一般采用单发多收的方法,即利用天线的一个相位中心发射,接收时利用天线的多个相位中心同时接收,一个发射相位中心和 N 个接收相位中心可以形成 N 个等效相位中心,将系统工作的 PRF 降低 N 倍,从而将测绘带幅宽扩展为原来的 N 倍。

相对于单发多收,MIMO 可以进一步扩展相位中心的数量。通过收发组合,可以形成更多的等效相位中心,以沿航迹排列的 3 发 3 收 MIMO 阵列为例,在一个脉冲重复周期内可形成 5 个等效相位中心,如图 3 所示。

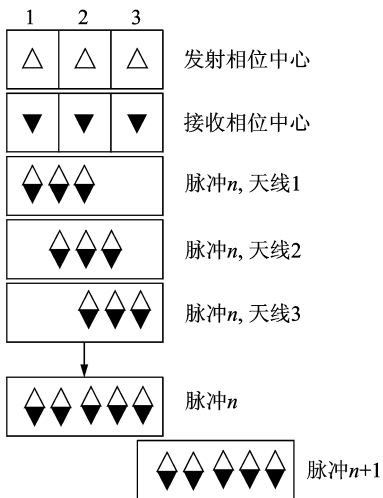


图3 MIMO-SAR 形成多个等效相位中心
(沿航迹 3 发 3 收阵列)

Fig. 3 Equivalent phase centers of MIMO-SAR
(3 transmitters and 3 receivers along track)

理论上, M 个发射相位中心和 N 个接收相位中心可以形成 $M \times N$ 个等效相位中心,将系统工作的 PRF 降低 $M \times N$ 倍,从而将测绘带幅宽扩展为原来的 $M \times N$ 倍。

2.2 MIMO-SAR-GMTI

对于星载 SAR-GMTI,由于卫星飞行速度快,天线波束照射范围大,杂波多普勒谱很宽,地面运动目标的多普勒频移几乎都落在杂波谱内,无法采用滤波法将动目标检测出来。必须采用多通道的方法,即利用沿飞行方向分置的多个天线(或天线子阵),形成多个接收通道,通过 DPCA(Displaced

phase center antenna), ATI (Along track interferometry) 或空时自适应处理 (Space-time adaptive processing, STAP) 等处理来实现 GMTI。

在 SAR-GMTI 系统中,沿航迹的基线长度和通道数对于 GMTI 性能具有决定性作用。基线长度越长,最小可检测动目标速度越低;通道数越多,处理的自由度越多,杂波抑制性能越好。

目前的 SAR-GMTI 多采用单发多收来形成多个通道, N 个接收天线可以形成 N 个等效相位中心,对应 N 个接收通道,最大基线长度为天线方位向长度的一半。如果采用 MIMO 技术, N 个发射天线和 N 个接收天线,就能形成 $2N-1$ 个等效相位中心,对应 $2N-1$ 个接收通道,并且基线长度可以利用天线的全部方位向长度。单发多收和多发多收情况下的等效相位中心如图 4 所示^[15]。

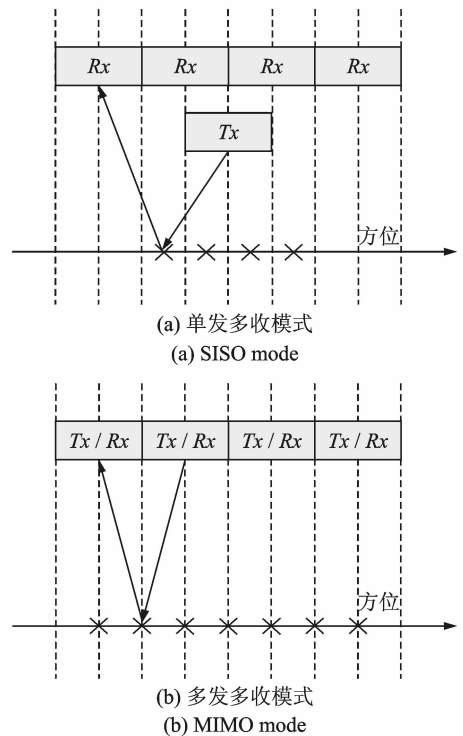


图4 单发多收和多发多收情况下的等效相位中心^[15]
Fig. 4 Equivalent phase centers with SISO (Single input single output) and MIMO mode

2.3 MIMO-SAR 距离向超分辨率

在不同视角下对地面目标成像,地面回波的频谱成分会有差别,利用这种差别可以合成更宽的地面回波频谱,从而获得更高的地面目标分辨率^[16,17],实现所谓的超分辨率。

对于星载 SAR 系统,在垂直 SAR 平台飞行方向上,采用多个分布式天线,以不同视角对地面成像,就可以实现距离超分辨。对于传统的多视角超

分辨技术,每个天线都是独立收发。假设天线数目是 N ,发射信号带宽是 B ,则合成带宽最大为 $N * B$,分辨率提升倍数为 N 。如果利用 MIMO SAR 技术,则合成带宽最大可以达到 $N * (N+1) * B/2$,分辨率可以提升 $N * (N+1)/2$ 倍。

随着 N 的增加,MIMO 技术获得的超分辨率性能将大大超过传统方法,如表 1 所示。

表 1 超分辨率性能对比

Table 1 Super resolution performance comparison

天线数 N	传统独立单发单收 分辨率提升倍数	MIMO 分辨率提升倍数
2	2	3
3	3	6
4	4	10

2.4 MIMO-SAR 极化体制

对于极化 SAR 系统,为了获得全极化数据,一般采用时分方法,即交替发射水平极化(H)和垂直极化(V)电磁波,并同时接收两种极化波的回波。通过发射和接收的不同组合,在两个 PRT 周期内,可获得 HH,HV,VH,VV 四种极化的回波。在分辨率一定的情况下,必须把系统工作的 PRF 提高一倍,才能满足方位向采样率和四极化数据获取的要求,由此也造成测绘带宽度减少一半。相对于传统 SAR 对分辨率和幅宽比值为 10 的约束条件,极化 SAR 的约束更苛刻,测绘带幅宽(km)/分辨率(m)一般只能达到 5 左右。这大大限制了极化 SAR 系统的成像能力。

采用 MIMO 技术,可以在一个周期内同时发射 H 和 V 极化脉冲,两种极化发射波形可以采用时间上不重合的子脉冲^[18]或采用 OFDM^[9]。前者与 DBF 结合,通过 DBF 空间滤波实现波形分离;后者则直接采用多相滤波器分离。这两种方法都可以很好地实现全极化数据的获取,而不要求 PRF 加倍,保证测绘带幅宽不会减半。因此,采用 MIMO 技术可以将目前的极化 SAR 性能提升一倍。

3 MIMO-SAR 回波互相关干扰分析

目前 MIMO-SAR 常采用正交编码波形作为发射端信号,多个接收天线同时接收回波。这里以两发两收 MIMO-SAR 为例,分析回波信号的互相关干扰^[13]。两个子天线发射信号分别为 s_1 和 s_2 ,传输函数分别为 h_1 和 h_2 ,发射和接收处理框图如图 5 所示。

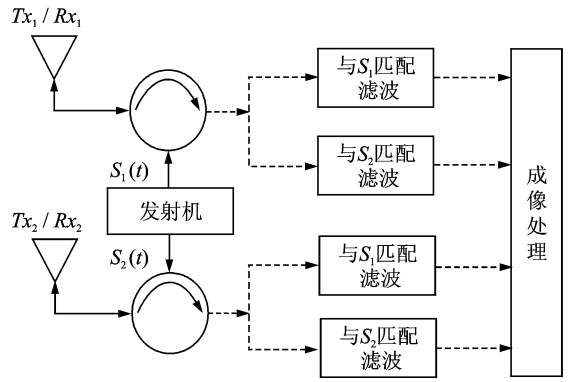


图 5 两发两收 MIMO-SAR 处理^[13]

Fig. 5 MIMO SAR operating mode with 2 transmitters and 2 receivers

接收天线 Rx_1 的接收信号为

$$r_1 = h_1 \otimes s_1 + h_2 \otimes s_2 \quad (1)$$

将接收信号分别与 s_1 和 s_2 做匹配滤波,分离各相位中心信号。当分离信号为 $s_1(t)$ 时,将 $r_1(t)$ 与 $s_1^*(-t)$ 匹配滤波,得到信号

$$y_1(t) = r_1 \otimes s_1^* = (h_1 \otimes s_1 + h_2 \otimes s_2) \otimes s_1^* = h_1 \otimes s_1 \otimes s_1^* + h_2 \otimes s_2 \otimes s_1^* = y_{\text{auto}} + y_{\text{cross}} \quad (2)$$

信号 $y_1(t)$ 由两部分组成,一部分是与 $s_1(t)$ 自相关的信号 y_{auto} ,另一部分是与 $s_1(t)$ 互相关的信号 y_{cross} 。因为 SAR 回波信号为地面各散射体回波的叠加,所以由匹配滤波带来的互相关噪声经过叠加后会显著增大,使距离向旁瓣升高,不利于分布目标成像。

假设 s_1 和 s_2 分别为正负线性调频信号,图 6 中虚线为 MIMO-SAR 距离向匹配滤波结果,实线为 SISO-SAR 距离向匹配滤波结果。可见,MIMO-SAR 由于发射波形之间的影响,经匹配滤波后旁瓣升高。对分布目标成像时,互相关噪声经过

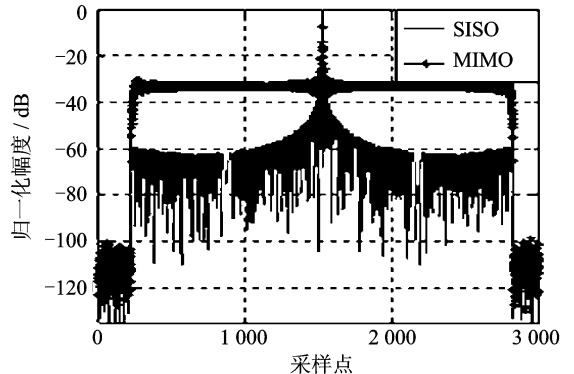


图 6 MIMO-SAR 和 SISO-SAR 距离向匹配滤波结果比较^[13]

Fig. 6 Comparison of MIMO-SAR and SISO-SAR with matched filtering results in range direction

叠加后增大旁瓣电平,严重影响成像质量,甚至难以成像。

Krieger 对使用正负调频斜率的 MIMO-SAR 图像进行仿真,表明在典型场景下,互相关干扰使图像质量严重下降,如图 7 所示^[15]。从 MIMO-SAR 的分析和仿真可以看出,直接采用正交波形和匹配滤波,无法抑制互相关干扰,进而严重影响 MIMO-SAR 的成像质量。

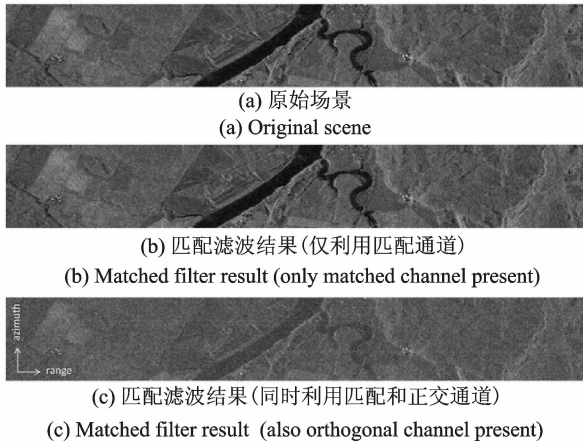


图 7 采用正交波形的 MIMO-SAR,互相关干扰引起图像质量下降^[15]

Fig. 7 Simulation of MIMO-SAR imaging based on the simultaneous transmission of up- and down-chirps

4 MIMO-SAR 波形分离方法

为了能在接收端有效地分离出不同发射天线对应的回波,可以采用多种方法。目前有 5 种基本方法。

4.1 时分切换发射

该方法实现简单,即不同的发射天线在相邻的脉冲周期内交替发射,所有接收端同时接收回波,经过多个脉冲周期后,就可以形成所有的收/发组合。

对于时分切换发射,完全避免了接收端的信号分离问题,德国 FGAN 的 ARTINO MIMO-SAR 系统就采用了这种方法。时分切换如图 8 所示^[6]。时分切换发射的方法存在缺点,它要求 PRF 必须加倍,在星载条件下局限性很大。

4.2 频分波形

对于 MIMO-SAR,如果要求互相关干扰完全不存在,则不仅要求不同发射波形在 0 时刻不相

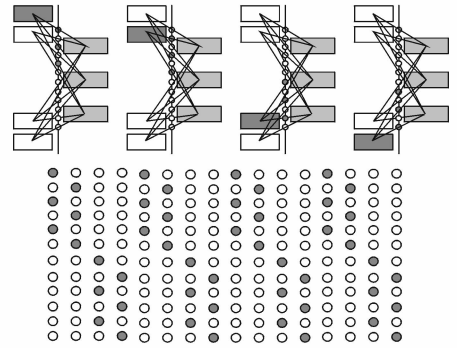


图 8 ARTINO MIMO-SAR 系统中采用的时分切换发射方法^[6]

Fig. 8 Tx switching and the resulting synthetic array

关,还要求在所有的时移条件下也不相关,即发射波形 $s_i(t)$ 和 $s_j(t)$ 不仅满足

$$\int s_i^*(t) \cdot s_j(t) dt = 0, i \neq j \quad (3)$$

而且还要满足

$$\int s_i^*(t) \cdot s_j(t + \tau) dt = 0, \forall \tau \in \mathbf{R}, i \neq j \quad (4)$$

根据 Parseval 定理,可以得到

$$s_i(t) \otimes s_j(t) = F^{-1}[S_i^*(f) \cdot S_j(f)] = 0 \quad (5)$$

其中 $S(f)$ 表示 $s(t)$ 的频域信号, t 表示任意时移。可以看出,如果要求互相关在所有时移下都为零,则不同发射波形的频谱不能重叠。因此,在 MIMO-SAR 中可采用频分波形,即各发射波形占据不同频谱范围。频分波形的缺点有两个,一是当发射天线数量较多时,整个系统需要很大的频谱范围;二是各发射波形完全失去了相关性,在后续许多需要相干合成的应用场合,无法使用。

4.3 短时移正交波形和 DBF

该方法不要求正交波形在所有的时移下都不相关,只要求在短时移 τ 内不相关,当超出 τ 的范围时,依靠 DBF 的空间滤波来消除互相关干扰。这种短时移正交波形可以有两种方式:一是采用时域不重合的子脉冲,二是采用移频 LFM 信号。

Krieger 给出了第二种方式的波形考虑^[15,19],如图 9 所示。图中的两个 LFM 信号在 $[-\frac{\tau}{2}, \frac{\tau}{2}]$ 范围内接近为零。

当两个波形的回波差大于 τ 时,再采用 DBF 进行空间滤波。

4.4 OFDM 波形

Kim 将 OFDM LFM 波形引入 MIMO-SAR

中^[8],将 LFM 信号在频域离散化,分成多组,各组间交织挑选频点,频点间相差 Δf ,且 $\Delta f = B/N$,

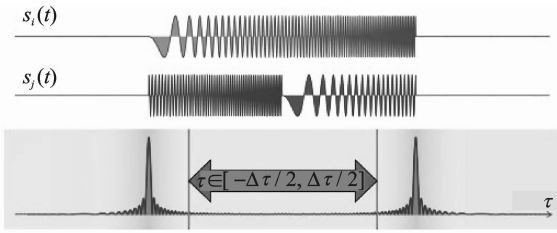


图 9 短时移正交波形^[15,19]

Fig.9 Short-term shift orthogonality

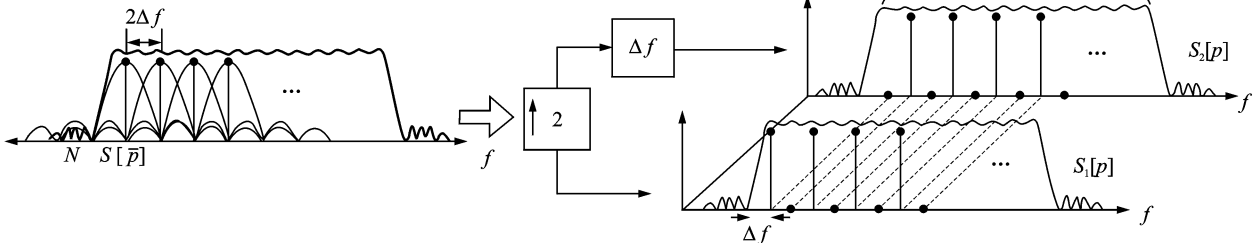


图 10 OFDM 波形的生成^[8]

Fig.10 Generation of two orthogonal OFDM chirp waveforms^[8]

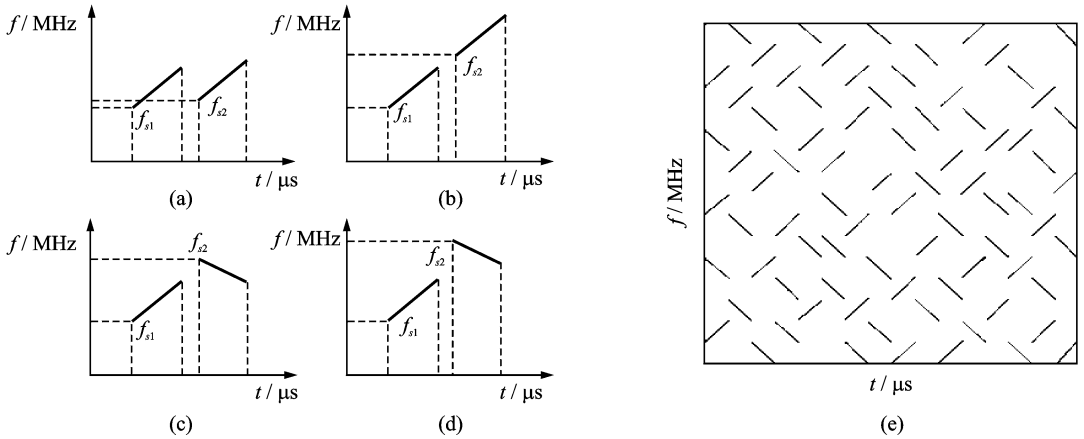


图 11 Wang 提出的 OFDM 波形^[10]

Fig.11 OFDM waveforms by Wang^[10]

4.5 空时编码

空时编码 (space-time-code, STC) 是 MIMO 系统中一种常用的编码方式,最早用于无线通信。它对多个时刻的发射波形进行互补调制,然后在接收端进行合成,不但可以完全对消不同发射波间的互相关,而且可以得到处理增益。Alamouti 编码是其中最常用的空时编码。

Alamouti 编码方式可采用复单位线性编码方式,如图 12 所示^[13]。第一个周期,发射天线 Tx_1 和 Tx_2 分别发射 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 。下一个发射周期, Tx_1 和 Tx_2 分别发射 $s_2^*(-t)$ 和 $-s_1^*(-t)$,然

如图 10 所示。这种 OFDM 波形对应的回波需要先进行空间滤波分段,使每段长度小于发射脉冲宽度,然后采用循环移位相加和离散傅里叶变换 (Discrete Fourier transformation, DFT) 处理就可以实现回波的分离和压缩。

Wang^[10] 提出了另一种 OFDM 波形,将子 LFM 串在时频域上进行组合,形成新的正交波形分集,如图 11 所示。但是,该方法在实现上存在问题^[15]。

后不断重复。则接收信号可以表示为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}_N &= \begin{bmatrix} R_{n1} \\ R_{n2}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 S_1 + H_2 S_2 \\ H_1^* S_2 - H_2^* S_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ -H_2^* & H_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{bmatrix} = \mathbf{HS} + \mathbf{n} \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中: S_1, S_2 分别为 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 的频域形式。 H_1 和 H_2 分别为空间上两个不相关的通道响应, n_1 和 n_2 为相应的噪声。接收端根据接收回波来检测发射信号,因此需要估计通道响应。利用通道响应,Alamouti 解码器提取具有空间分集的发射信

号,其中解码器为

$$D_e = H^H = \begin{bmatrix} H_1^* & -H_2 \\ H_2^* & H_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

解码后信号为

$$R = D_e R_N = D_e (HS + n) = \|H\|_F^2 S + n' = \begin{bmatrix} (|H_1|^2 + |H_2|^2)S_1 \\ (|H_1|^2 + |H_2|^2)S_2 \end{bmatrix} + n' \quad (8)$$

式中: $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置, $\|\cdot\|_F^2$ 表示 2 范

数。从式(8)可知,理想情况下经过解码处理后得到 3dB 分集增益。

对于更多的发射天线情况,可以采用更多的空时编码串,如图 13 所示^[20]。图中 a_{ij} 为编码的调制系数。

与时分切换方法一样,空时编码也需要多个脉冲周期才能完成所有的收发组合。但空时编码可在接收处理中获得增益,这一点优于单纯的时分切换方式。

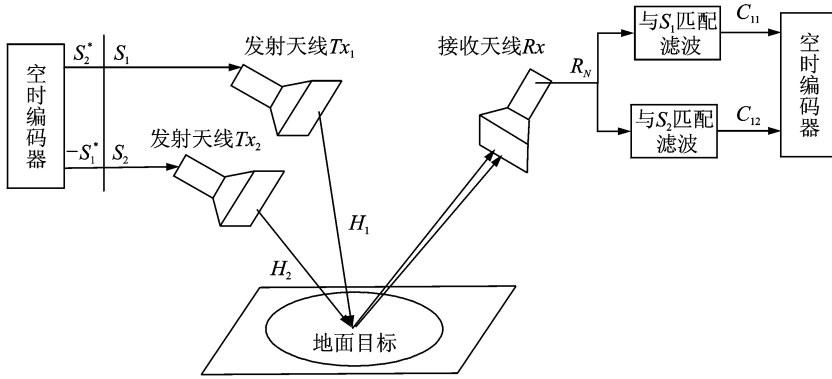


图 12 使用 Alamouti 空时编码的 MIMO 系统^[13]
Fig. 12 MIMO system with Alamouti space-time encoding

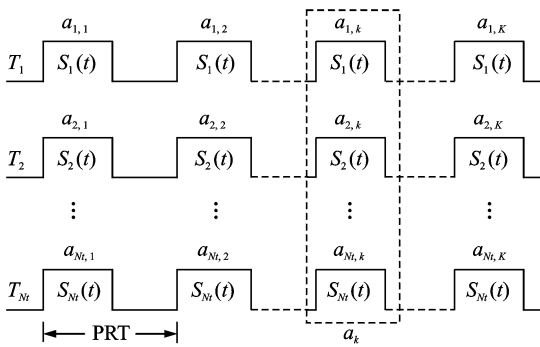


图 13 空时编码串组^[20]
Fig. 13 Space time coding series

5 MIMO-SAR 波形分离新方法

从前面介绍的多种波形设计及其分离方法可以看出,每种方法都有各自的特点和约束条件。可以对其进一步组合和综合优化,形成一些新的波形分离方法。

(1) 时分和频分

利用 N 个发射天线,在 N 个脉冲周期内轮流发射不同子频段的脉冲。每个脉冲周期,接收天线接收一组对应子频段的回波,经过 N 个周期的回

波组合,就可以形成覆盖整个频段的回波信号。

这种方法同时满足发射波互不相关,接收回波可分离,并且利用脉冲在时间上的重复,减小对系统瞬时带宽的要求,实现完整的频谱覆盖。

(2) 空时编码和 DBF

DBF 空间滤波技术,利用回波时间差与视角差的对应关系分离回波。在一个脉冲周期内发射所有的空时编码信号,各组发射信号间都有一定的延时,利用回波信号间的时延信息,通过 DBF 技术,就可以得到不同发射脉冲对应的回波,实现信号分离。这种方法与单纯的空时编码需要多个脉冲周期相比,只需要一个脉冲周期,就能获得所有的收/发组合,并完成回波分离。

(3) OFDM 和空时编码

OFDM 波形码丰富,但采用频谱重叠的 OFDM 波形并不能解决 MIMO-SAR 的回波分离问题。OFDM 可以与空时编码结合,通过不同脉冲周期内发生对偶的 OFDM 波形,就可以实现互相关能量的抵消。

(4) OFDM,空时编码和 DBF

采用不同的 OFDM 编码可以改变回波互相关

函数在时域上的分布,空时编码可以实现多个脉冲周期互相关回波的对消。考虑到 SAR 回波时域和空域的对立关系,针对时域上互相关能量集中的区域,再利用 DBF 进行空域滤波,进一步抑制互相关回波的能量,实现更高性能的回波分离。

另外,还可以考虑其他的正交波形及其分离方法。例如 Baker 码,伪随机码,非线性调频信号等。

6 结束语

本文介绍了 MIMO-SAR 的原理和发展,总结了 MIMO-SAR 的优势及应用能力,重点针对目前各种回波分离方法进行分析对比。虽然国内外已提出了许多 MIMO-SAR 体制及其信号处理方法,但回波分离仍然是 MIMO-SAR 实现的关键。在将来的研究中,需要结合不同用途的 MIMO-SAR 系统,综合优化,以期得到更好的分离方法。

参考文献:

- [1] Chizhik D, Foschini G J, Gans M J, et al. Keyholes, correlations, and capacities of multi-element transmit and receive antennas [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 1(2): 361-368.
- [2] Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless personal Communications, 1998, 6(3): 311-318.
- [3] Gesbert F, Bolcskei H, Gore D A, et al. Outdoor MIMO wireless channels: Models and performance prediction [J]. IEEE Trans on Continun, 2002, 50(12): 1926-1934.
- [4] Fishler E, Haimovic A, Blum R, et al. MIMO radar: An idea whose time has come [C] // Proc IEEE Radar Conference. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2004: 71-78.
- [5] Ender J. MIMO-SAR [C] // Proc Int Radar Symp. Cologne, Germany: [s. n.], 2007: 667-674.
- [6] Ender J, Klare J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR [C] // IEEE GRS Symposium. Pasadena, CA: IEEE, 2009: 38-43.
- [7] Krieger G, Gebert N, Moreira A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(1): 31-46.
- [8] Kim J. A novel OFDM chirp waveform scheme for use of multiple transmitters in SAR [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 568-572.
- [9] Kim J, Younis M, Moreira A. A novel OFDM waveform for fully Polarimetric SAR data acquisition [C] // Proc EUSAR. Aachen, Germany: VDE, 2010: 1-4.
- [10] Wang Wenqing. OFDM waveform diversity design for MIMO SAR imaging [C] // IGARSS. Munich: IEEE, 2012: 2090-2093.
- [11] Wang Wenqing. Space-time coding MIMO-OFDM SAR for high-resolution imaging [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2011, 49(8): 3094-3104.
- [12] 齐维孔, 禹卫东, 祁海明. 星载 MIMO-SAR 与距离向 DBF 相结合系统研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2251-2257.
Qi Weikong, Yu Weidong, Qi Haiming. Study of the system combining spaceborne MIMO-SAR and elevation DBF [J]. Journal of Electronics, 2010, 38(10): 2251-2257.
- [13] 齐维孔. 基于 DBF 和 MIMO 的星载 SAR 系统及其信号处理研究 [D]. 北京: 中科院电子所, 2010.
Qi Weikong. Study on spaceborne synthetic aperture radar system and signal processing based on digital beamforming and multiple-input multiple-output [D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [14] 孟藏珍, 许稼, 王力保, 等. 基于 Clean 处理的 MIMO-SAR 正交波形分离 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(12): 2809-2814.
Meng Cangzhen, Xu Jia, Wang Libao, et al. An orthogonal waveforms separation method based on clean processing in MIMO-SAR [J]. Journal of Electronics and Information, 2013, 35(12): 2809-2814.
- [15] Krieger G. MIMO-SAR: Opportunities and pitfalls [J]. IEEE TGRS, 2013, 52(5): 2628-2645.
- [16] Prati C, Rocca F. Improving slant-range resolution with multiple SAR survey [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1993, 29(1): 135-143.
- [17] Christallini D, Patina D, Lombardo P. Exploiting MIMO SAR potentialities with efficient cross-track constellation configurations for improved range resolution [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2011, 49(1): 38-52.
- [18] 齐维孔, 禹卫东. 一种新的多极化星载 SAR 工作方式研究 [J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(10): 1394-1408.

Qi Weikong, Yu Weidong. A new research on the working mode of multi-polarization spaceborne SAR [J]. Chinese Science: Information Science, 2010, 40 (10):1394-1408.

- [19] Krieger G. MIMO-SAR and the orthogonality confusion[C]//IGARSS. Munich:IEEE,2012:1533-1536.
- [20] Song Xiufeng, Willett P, Zhou Shengli. Waveform interference mitigation for a shared spectrum MIMO

radar system[C]//IEEE Radar Conference. Marriott Crystal Gateway Arlington, VA, USA: IEEE, 2010: 1386-1391.

作者简介:禹卫东(1969-),男,研究员,博士生导师,研究方向:SAR系统及其理论、SAR信号处理、电路设计等, E-mail:ywd@mail.ie.ac.cn;李红霞(1986-),女,硕士研究生,研究方向:MIMO-SAR信号分析与处理。

