

北斗卫星后向散射信号的星-星合成孔径成像系统：概念与可行性

王海洋* 江月松

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘要：该文提出了一种利用北斗卫星的后向散射信号形成的星-星双站合成孔径成像系统的概念，建立了该成像系统的北斗地球静止轨道卫星和地球同步轨道卫星以及地面站之间的几何模式，并依此模式和双站合成孔径雷达成像原理，从成像分辨率、信噪比、链路收支等性能参数论证了利用北斗卫星建立星-星双站合成孔径雷达对地成像观测的可行性，此外还提出了该系统在土壤湿度探测、地表演化的时空动力学特征研究、大气特性研究方面的遥感应用前景。

关键词：北斗卫星；双站；星-星合成孔径成像；对地观测

中图分类号：TP79

文献标识码：A

文章编号：2095-283X(2012)02-0209-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20041

A Synthetic Aperture System Based on Backscattering Signals of Compass Navigation Satellite: Concept and Feasibility

Wang Hai-yang Jiang Yue-song

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A concept of a bi-static geosynchronous synthetic aperture system, which is formed by reusing backscattered signals of Compass Navigation Satellite System (CNSS), is proposed. The geometric relations of a geostationary satellite of CNSS, located on a geosynchronous satellite receiver, which is illuminated by the backscattered energy of a satellite of CNSS, and a ground station is built up, and following the relations as well as principle of synthetic aperture radar, we expatiate the feasibility of the system by considering parameters such as imaging resolution, ratio of signal to noise and link budget, etc.. Besides, the potential remote sensing applications for measurement of terrain humidity, characteristics of space-time dynamics of changing of terrain surface and atmospheric characteristic, etc..

Key words: Compass Navigation Satellite System (CNSS); Bi-static; Imaging of synthetic aperture; Observation of earth

1 引言

中国正在建设的北斗卫星导航定位系统(Compass Navigation Satellite System, CNSS),其目的是完成对地面各种目标的定位、导航、授时、监测和管理等。该系统由若干颗静止轨道卫星和若干颗地球同步轨道卫星构成^[1-3],其中的地球静止轨道卫星在工作时,上行链路使用 L 波段(1.610 GHz-1.6265 GHz),下行链路使用 S 波段(2.4835 GHz-2.50 GHz)。北斗卫星系统的建设目标是提供在中国及其周边地区范围内的定位、授时、报文和 GPS 广域差分等服务功能,但设计和建造目标中没有成像观测服务功能。实际上,还可以进一步开发

利用地面对北斗系统中的地球静止轨道卫星向地面发射的微波信号的散射信号,形成对地成像观测能力,以致在几乎不增加原建设成本的情况下,增加北斗系统的成像观测功能。本文基于中国北斗卫星系统的现状,结合合成孔径成像雷达原理^[4],提出再次利用北斗系统中的地球静止轨道和同步轨道卫星以及地面接收站,实现双站合成孔径成像雷达的系统的设想,对于发展具有中国自主知识产权的、集导航、定位、授时、通信以及合成孔径成像对地观测于一体的卫星系统,具有极为重要的意义。

本文进一步发展我们已经提出的利用北斗卫星反射信号的空间-地表合成孔径成像雷达系统^[5],提出了另一种新形式的双站合成孔径雷达系统。这里提出的系统概念是:用一颗轨道平面与赤道平面有微小倾角的地球同步轨道卫星作为接收机,接收由

2012-05-24 收到, 2012-06-12 改回; 2012-06-18 网络优先出版
国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA****9B8)资助课题
*通信作者: 王海洋 wang_wsm@163.com

北斗系统中与同步卫星靠近的一颗地球静止轨道卫星辐射到地面上的后向散射信号，再将所接收的信号发射至地面接收站，地面接收站同时接收来自静止轨道和同步轨道卫星的信号，并按照合成孔径雷达成像方法进行互相关和成像处理，就可能产生对观测地面的有用图像。本文将从此概念出发，建立基于静止轨道卫星和同步轨道卫星的合成孔径雷达成像的几何关系，并从成像分辨率、信噪比、链路收支等方面论证合成孔径雷达成像原理和可行性，并展望系统在土壤湿度探测、地表演化的时空动力学特征研究、大气特性研究方面的应用前景。对于双站合成孔径成像系统而言，同步问题(时间同步/空间同步)是极为关键的问题，我们今后会持续深入研究。

2 系统构成方式

图 1 是基于北斗卫星的合成孔径雷达成像示意图。图中 A 是处于地球静止轨道上的北斗卫星，它向地面发射宽带微波信号，合成孔径雷达的同步轨道卫星 B 收集从卫星 A 覆盖的范围内散射的信号并立即再将这些信号发向地面接收站 C，地面接收站同时接收 A 和 B 发来的信号，并对所接收的信号进行处理便可形成卫星 B 所观测的地表图像。因此，在卫星上不需要大的计算量。地面接收站 C 处即为 GPS 接收机，其接收性能与 GPS 接收机性能相同。

应用同步轨道卫星 B 的主要原因是使被观测目标与接收天线之间有相对运动以便形成合成孔径。此外，为了使 B 避免直接接收太强的 A 的信号，B 与 A 不在同一经度上，B 在经度上偏离 A 一定的角度 θ 。因卫星 B 轨道与赤道平面有偏离，所以 B 相对于地球是一个北-南方向的简谐运动(实际上在空中形成一个“8”字，但在“8”字形中间，卫星相对运动轨迹近似为直线，且因为卫星运动轨道严格已知，所以可以通过运动补偿来消除空间曲线运动)，通过调节卫星 B 的离心率和轨道平面的倾角还可以在空气中形成圆或椭圆等形式的航迹。因地球静止轨道对卫星轨道的扰动很小，改变卫星航迹所需的能耗很小^[6]。

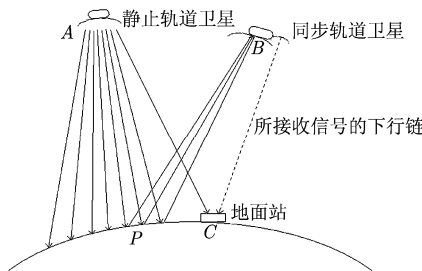


图 1 基于北斗或通信卫星的被动双站合成孔径雷达成像示意图

与图 1 相对应的合成孔径成像系统的几何关系如图 2 所示。图 2 中，A 是位于赤道平面上的地球静止轨道上的北斗卫星，相对地面静止，发射微波波束照射地球表面；B 是偏离赤道平面的位于地球同步轨道上的形成被动合成孔径的成像雷达卫星，相对于地面有相对运动，它收集地表对卫星 A 信号的散射信号。 $y = v_B t$ 是卫星 B 离开 A 的距离， $R(x, y)$ 代表卫星 B 和点目标 $P(x)$ 的距离，也即随时间变化的斜距。 $R(x)$ 表示卫星 A 与点目标 P 的距离。 $R(y)$ 表示卫星 B 到地面站的距离。 R_1 是卫星 A 到地面站的距离， R_2 是最短斜距。若只考虑信号性质，可以看作 $R_1 \approx R_2 = R$ 。

若卫星 B 偏离赤道的最大距离为 50 km，则卫星 B 的轨道倾角 i_0 约为 0.06794° (见图 3)，则卫星 B 在赤道惯性坐标系(图 3)中的位置 r_{S_R} 为^[6,15]

$$r_{S_R} = \frac{a(1-e^2)}{1+e\cos\gamma} \cdot \begin{bmatrix} \cos\Omega\cos(\omega_0+\gamma) - \sin\Omega\sin(\omega_0+\gamma)\cos i_0 \\ \sin\Omega\cos(\omega_0+\gamma) + \cos\Omega\sin(\omega_0+\gamma)\cos i_0 \\ \sin(\omega_0+\gamma)\sin i_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中， $a = \sqrt[3]{\mu/\omega_e^2} = 42164.17$ km，是地球同步轨道半径；且 $\mu = 398600.44$ km³/s²，是地心引力常数； $\omega_e = 7.2921 \times 10^{-5}$ rad/s，是地球自转的角速度； $e, \Omega, \gamma, \omega_0$ 分别是卫星 B 的轨道的偏心率、升交点赤经(节线与 I 轴的的夹角)、真近点角和近地点幅角^[6,7]。

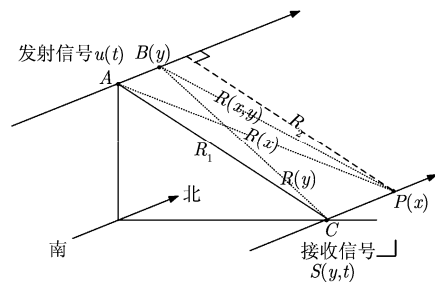


图 2 合成孔径成像的几何关系

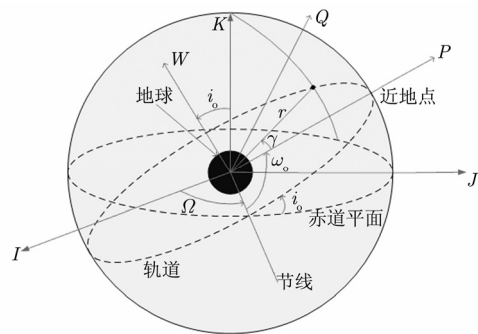


图 3 赤道惯性坐标系(I, J, K)

在赤道惯性坐标系中，理想的地球同步轨道的偏心率 $e=0$ ，应用球面三角关系可得升交点赤经 $\Omega=0^\circ$ 情况下卫星 B 的位置矢量为^[8]

$$r_B = a \begin{bmatrix} \cos^2 \omega_e t + \cos i \sin^2 \omega_e t \\ (\cos i_0 - 1) \cos \omega_e t \sin \omega_e t \\ \sin i_0 \sin \omega_e t \end{bmatrix} \quad (2)$$

则卫星 B 的速度为：

$$v_B = \omega_e a \begin{bmatrix} 2(\cos i_0 - 1) \sin \omega_e t \cdot \cos \omega_e t \\ (\cos i_0 - 1) \cos 2\omega_e t \\ \sin i_0 \cos \omega_e t \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可知， v_B 矢量只有南-北方向分量不为零，其余分量则非常小，可近似为零。图 4 是根据式(3)得出的卫星 B 在 24 小时内的 v_B 矢量的南-北分量的变化情况，近似于余弦变化规律，卫星的速度主要是取决于南-北徘徊速度分量，速度大小在 $\pm 0.004 \text{ m/s} \sim \pm 3.7 \text{ m/s}$ 范围内变化。这说明，我们可以将卫星 B 看着是在地面 36000 km 高度上南北飞行的、以“驻留和行走”方式工作的双站合成孔径雷达的接收器，它接收北斗卫星发送的已知的伪随机序列信号。因卫星速度接近零时的多普勒频移很小，对合成孔径成像的贡献不大，此时可专门用于传输回波数据到地面接收站。从图 4 可见，取卫星平均速度 $v_B=2.5 \text{ m/s}$ 为合成孔径成像速度，对 72 km 范围的区域成像，则所需要的成像观测时间约为 $T_0=8 \text{ h}$ 。

3 成像原理

合成孔径雷达的成像主要是基于不同距离的散射体会产生特征的互相关峰，在观测时间间隔 ΔT 内测量两个信号(A和B)(回波信号和参考信号)的时变互相关并以通常的相关 chirp 响应方式存储起来，若是对某一特定区域成像，则可应用聚焦技术的聚焦模式，便可形成合成孔径雷达图像^[4,9,10]。合成孔径雷达(SAR)成像技术主要包括数据获取和图像聚焦两个步骤，数据获取可由数据采集系统完成，聚

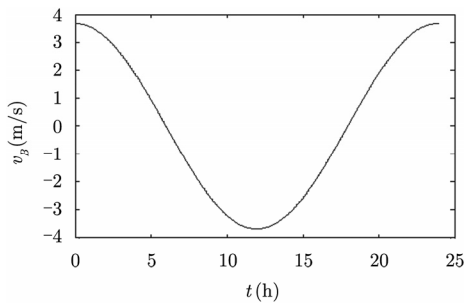


图 4 v_B 在 0~24 小时的变化情况

焦(技术)处理可分为斜距向聚焦和方位向聚焦^[4,9,10]。北斗卫星播发的信号类似于 GPS, Galileo 等其他全球导航卫星系统(GNSS)信号，都是将采样某种编码方式(BOC, GC 等)编码的导航电文码以调相方式调制到载波信号(L 波段)上^[17-19]，并采用伪随机码扩频技术来提高定位测距精度，如图 5 所示。虽然信号形式不同于常规线性调频信号，但都可以通过匹配滤波实现距离压缩。即将接收信号和卫星 A 直接发送的参考信号互相关来获取相关峰值。而方位压缩则与常规 SAR 算法基本无异。下面具体讨论。

3.1 斜距向聚焦

斜距聚焦是通过将后向散射信号与发射信号互相关而得到，也就是通常意义上的匹配滤波，互相关窗口时间长度就是“驻留时间”长度 ΔT ，等价的脉冲重复频率为 $1/\Delta T$ 。 ΔT 既取决于成像面积的斜距刈幅也取决于成像面积的方位向的宽度，设卫星 B 所观测的是由 A 所照射面积内直径为 D 的一个圆，为了能够从直径为 D 的面积中收集回波，窗口的持续时间 ΔT 应该比斜距刈幅的持续时间 τ_r 长许多，即：

$$\Delta T \gg \tau_r = \frac{D \sin \alpha}{c} = \frac{1.5 \times 10^6 \sin 35^\circ}{3 \times 10^8} \approx 2.9 \text{ ms} \quad (4)$$

在式(4)中，假设是对中国及其周边地区成像，接收器的入射角 $\alpha=35^\circ$ ， $D=1500 \text{ km}$ ， c 是光速。另一方面， ΔT 的上限取决于所成像面积方位向的刈幅宽度。图 2 中， x 是沿着航迹方向的地面散射体的坐标， $R(x, y)$ 是斜距，设某一时刻一个稳定的点散射体的反射率为 r_p ，因为观测时间 ΔT 相对于成像时间很短，可进一步假设接收卫星 B 在观测时间 ΔT 内并不移动，则所发射的基带信号 $u(t)$ 和所接收的经过正交解调后的基带信号 $s(y, t)$ 之间存在下列关系：

$$s(y, t) = G \cdot r_p \cdot u \left(t - \frac{d_{\text{Tot}}}{c} \right) \exp \left(\frac{j2\pi d_{\text{Tot}}}{\lambda} \right) \quad (5)$$

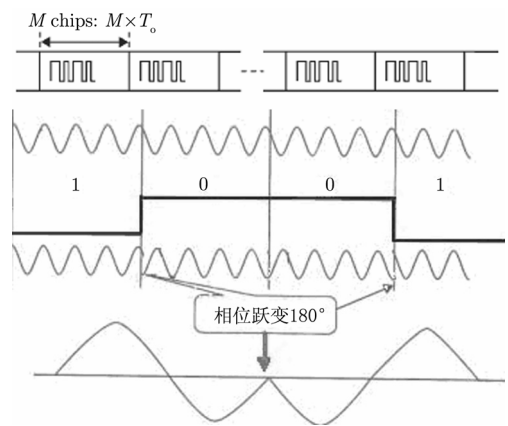


图 5 北斗卫星信号示意图

式(5)中, G 是系统的增益常数, λ 是波长, 指数项是由于载波的相位延迟。 d_{Tot} 是信号所经过的总的路程, 即:

$$d_{\text{Tot}} = d_{\text{T}} + d_{\text{R}} + d_{\text{RC}} \quad (6)$$

式(6)中, d_{T} 是信号从发射机到目标的距离, d_{R} 是散射信号所经过的距离, d_{RC} 是从 B 到地面站的距离。根据图 2, 则有:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_{\text{T}} = R_1 + \delta R_1 \Rightarrow (R_1 + \delta R_1)^2 \\ \quad = R_1^2 + x^2 \Rightarrow \delta R_1 \approx \frac{x^2}{2R_1} \\ d_{\text{R}} = R_2 + \delta R_2 \Rightarrow (R_2 + \delta R_2)^2 \\ \quad = R_2^2 + (x-y)^2 \Rightarrow \delta R_2 \approx \frac{(x-y)^2}{2R_2} \\ d_{\text{RC}} = R_1 + \delta R_1' \Rightarrow (R_1 + \delta R_1')^2 \\ \quad = R_1^2 + y^2 \Rightarrow \delta R_1' \approx \frac{y^2}{2R_1} \end{array} \right. \quad (7)$$

只考虑信号性质, 则可以看作 $R_1 \approx R_2 = R$, 且忽略常数项相位和增益, 可得出如下的接收信号的近似表达式:

$$s(y, t) \approx r_p u \left(t - \frac{x^2 - xy + y^2}{Rc} \right) \exp \left(\frac{j2\pi}{\lambda R} (x^2 - xy + y^2) \right) \quad (8)$$

对于条带成像的合成孔径雷达而言, 必须考虑“距离移动”(延迟)和“多普勒历史”(相位)项, 如果将接收信号 $s(y, t)$ 与发射信号 $u(t)$ 进行互相关, 就可以得到一个在滞后时间 $\tau = (x^2 - xy + y^2)/Rc$ 处显示一个峰的距离压缩信号 $z(y, \tau)$, 且 $z(y, \tau)$ 的振幅与反射率 $|r_p|$ 成正比, 其相位为

$$\varphi(y, \tau) = 2\pi (x^2 - xy + y^2) / \lambda R + \varphi(r_p)$$

$$\varphi(x, y) = 2\pi (x^2 - xy + y^2) / \lambda R + \angle r(x, R)$$

$\varphi(r_p)$ 是地面散射体对信号的附加相位。若设计信号带宽 $B=16$ MHz。根据斜距向分辨率和信号带宽的关系有 $\rho_r = c / (2B) \approx 10$ m。当然, 在实际应用中还要考虑距离压缩过程中加权函数所引起的波形展宽系数 k_t 以及处理电路不理想性所引起的波形展宽系数 k_m 。所以可以得到最终的地距分辨率 $\rho_g = c / (2B \sin \theta_1) \cdot k_t \cdot k_m$ 。其中 θ_1 是雷达波束在目标处的入射角。

3.2 方位向聚焦

由于北斗卫星发送的是脉冲占空比为 100% 的连续脉冲信号^[7], 为了仍然能够利用“驻留和行走”的假设, 将距离和方位向分开处理, 同时也为了避

免发生距离模糊, 要求斜距对应的回波时延应远小于方位向采样周期 ΔT , 即信号覆盖区域 D 的前后沿雷达回波必须位于一个采样周期 ΔT 内, 如前式(4)所述。另一方面, SAR 系统又是以脉冲重复频率 (PRF) 对方位向多普勒频谱进行采样的, 为了避免频谱折叠造成方位模糊, 根据奈奎斯特采样定理, 方位向采样频率 $\text{PRF}(\Delta T^{-1})$ 应大于方位向多普勒带宽, 即有: $1/\Delta T = \text{PRF} > B_a = v_B/l \Rightarrow \Delta T < \rho_a/v_B$ 。其中 $\rho_a = \theta'_{\text{BW}} \cdot R = \lambda R / D = \lambda R / (\theta_{\text{BW}} \cdot R) = \lambda R / (\lambda / l \cdot R) = l$ 是合成孔径方位向分辨率, l 是真实孔径长度, D 是理论上可以获得的最大合成孔径, 也即照射到地面的波束宽度。因为卫星 A 是相对目标静止的, 所以多普勒是单程的, 区别于一般 SAR 的分辨率 $\rho_a = l/2$ 。综上所述, 对波长为 $\lambda = 12$ cm (中心频率 $f_0 = 2.49175$ GHz, L 波段) 的信号而言, 天线从距离 36000 km 处照射到地面的波束宽度为 $D=1500$ km, 则有:

$$\tau_r \approx 2.9 \text{ ms} \ll \Delta T < \frac{\rho_a}{v_B} = \frac{\lambda R}{v_B D} = 1.15 \text{ s} \quad (9)$$

因 $\Delta T \gg \tau_r$, 可见, ΔT 中的相移远小于 π , 所以总体上, “驻留和行走”的假设是可以接受的。同时式(9)也意味着只要求北斗卫星接收天线的物理孔径 $L=1.15 \text{ m} \times 2.5 = 6.25$ m, 应用这一天线可以获得常规的合成孔径雷达成像带的方位向分辨率可以达到 $6.25 \text{ m}^{[4]}$ 。但实际上各种噪声的存在使得方位向的分辨率要低得多。但在成像合成孔径雷达系统中, 通常的做法是将 N 个方位线预先相加来实现以相同因子降低天线辐照面积和提高方位向分辨率。设本文所述系统的合成天线孔径限制在 $A_S=60$ km (即比成像条带宽度小 25 倍), 只要在 ΔT 期间预先相加后的天线脚印 F_p 比合成天线孔径 A_S 大, 方位向分辨率 ρ_a 就保持不变 (除了边缘效应), 则互相关窗口 ΔT 的上限是:

$$\begin{aligned} F_p &= \frac{\lambda R}{v_B \Delta T} \gg A_S = \frac{\lambda R}{\rho_a} \rightarrow \Delta T \\ &= \frac{\lambda R}{v_B F_p} < \frac{\lambda R}{v_B A_S} = \frac{\rho_a}{v_B} \end{aligned} \quad (10)$$

若 $F_p=180$ km, 则得到 $\Delta T = 9.6$ s。由于接收卫星运动的限制 ($A_S=60$ km), 这样以标称方位分辨率 $\rho_a = \lambda R / A_S = 72$ m 对一个刈幅宽度只有 $F_p - A_S = 120$ km 进行成像, 成像的刈幅是斜视南北向。维持 $F_p=180$ km 是为了避免在方位向聚焦时处理太大的距离移动项。

3.3 目标场重构

由以上分析知, 实际上卫星 B 是以距离间隔 $v_B \Delta T = 24 \text{ m}$ 的“驻留和行走”方式工作的, 设 y 是卫星 B 的方位位置, τ 是与成像刈幅中散射体的距离位置相关的时间延迟, 即 τ 可以从近距离的 t_{NR} 到远距离的 $t_{NR} + \tau_r$ 变化。对于以恒定斜距 R 沿着航迹的散射体, 由式(7)可以得出距离压缩信号 $z(y, \tau)$ 的表达式如下:

$$z(y, \tau) = \int_{-F_p/2}^{F_p/2} r_p \cdot h \left(\tau - \frac{x^2 - xy + y^2}{R \cdot c} \right) \cdot \exp \left(\frac{j2\pi}{\lambda R} (x^2 - xy + y^2) \right) dx \quad (11)$$

式(11)中的 $h(\tau)$ 是系统的斜距脉冲响应, 即具有 16 MHz 带宽和 ΔT 时间长度的两个同步随机序列相关的期望值。应当注意的是: 由于方位限制在 $\pm F_p/2$, 距离的移动是小的, 且驻留在近似的一个或两个斜距分辨率像素内, 这样可以认为脉冲响应 $h(\tau)$ 的距离移动项是一个可忽略的常数, 则下列采样表达式成立:

$$\begin{aligned} z(y, \tau) \exp \left(-\frac{j2\pi y^2}{\lambda R} \right) \\ = h(\tau) \int_{-F_p/2}^{F_p/2} r_p \exp \left(\frac{j2\pi x^2}{\lambda R} \right) \exp \left(-\frac{j2\pi xy}{\lambda R} \right) dx \end{aligned} \quad (12)$$

最后, 在后面分析的由 $h(\tau)$ 的非完全脉冲特征所引起的斜线效应, 移去滞后因子有:

$$z_1(y) = \int_{-F_p/2}^{F_p/2} r_{p1} \exp \left(-\frac{j2\pi xy}{\lambda R} \right) dx \quad (13)$$

式(13)中:

$$\begin{cases} z_1(y) = z(y, \tau) \exp \left(-\frac{j2\pi y^2}{\lambda R} \right) \\ r_{p1} = r_p \exp \left(\frac{j2\pi x^2}{\lambda R} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式(14)是 Fourier 变换形式, 如果在其两边乘以波束操控因子 $\exp(j2\pi y/\lambda R)$ 并从 $-A_s/2$ 到 $A_s/2$ 对 y 进行积分(合理的采样间隔是 $\Delta T/v_B$)就可以得到图像 $I(\xi)$:

$$I(\xi) = \int_{-A_s/2}^{A_s/2} z_1(y) \exp \left(\frac{j2\pi}{\lambda R} \xi y \right) dy = \int_{\xi - \lambda R/2A_s}^{\xi + \lambda R/2A_s} r_{p1} dx \quad (15)$$

式(15)是成像基础。

3.4 稳定目标脉冲响应和杂波信号

被带宽为 16 MHz(即去相关时间 $\tau_c = 62.5 \text{ ns}$) 的北斗卫星 A 的信号照射 ΔT 时间的一个地面上的

独立散射体, 其散射信号被给定位置处的卫星 B 所接收, 再通过互相关运算形成聚焦信号, 互相关总的延迟时间是 τ_r , 在信号传播时间加上存在一个恒定功率的随机噪声基底, 则形成的图像是互相关信号在散射体处有一个峰, 峰与基底的功率比是 $\Delta T/\tau_c$ 。对所有的 $T_o/\Delta T$ (T_o 为形成一幅图像的观测时间), 在 B 方位位置重复进行, 最后, 通过将再次赋予相位的距离压缩数据相加而获得散射体的聚焦合成孔径雷达图像。距离相关的峰值信号的和是相干的, 而噪声基底信号的和是非相干的。因此, 所产生图像是: 在整个图像上, 2 维常数基底信号上, 在散射体的位置处有一个峰。在整个图像中一个散射体的峰值信号与基底信号的功率比是^[4,9]:

$$\text{SNR}_1 = \frac{\Delta T}{\tau_c} \cdot \frac{T_o}{\Delta T} = \frac{8.0 \times 3600}{62.5 \times 10^{-9}} \rightarrow 117 \text{ dB} \quad (16)$$

式(16)中, 取有用的观测时间 $T_o = 8.0 \text{ h}$ 而不取 12 h 是为了丢弃卫星速度接近零时的合成天线的边缘效应。相关时间比 τ_c 小的不同散射体可以考虑为完全不相干的散射体, 这类独立散射体的脉冲响不显示出任何峰。

3.5 部分相干目标的脉冲响应与杂波信号

部分相干目标是指一个比 ΔT 小、但比 τ_c 大的相关时间为 τ_c 的非稳定的独立散射体(如通常取 L 波段的水和稠密的植被的 $\tau_c = 0.1 \text{ s}$), 其互相关运算的结果是在随机稳定的基底信号上的散射体位置处产生一个峰信号, 因为这种情况下的峰值功率与 τ_c/τ_c 成正比而不是与 $\Delta T/\tau_c$ 成正比, 所以其信噪比小于稳定散射体的信噪比。与完全相干目标的另一个不同之处是斜距聚焦线上 $T_o/\Delta T$ 的每一个峰互相之间是不相干的, 这样, 方位聚焦就在方位方向上产生一个被限制在部分相干目标的斜距子成像带的随机稳定信号(即: 一条噪声线而不是相干目标的一个峰, 方位向上的 1 维噪声基底)加上与相干目标情况一样的一个稳定的 2 维信号基底, 这样, 方位向的有用信号(稳定的相干目标峰值信号)与 1 维基底信号之间的功率比是:

$$\text{SNR}_2 = \frac{\Delta T}{\tau_c} \cdot \frac{\tau_c}{\tau_c} \cdot \frac{T_o}{\Delta T} = \frac{T_o}{\tau_c} \rightarrow 54.6 \text{ dB} \quad (17)$$

3.6 信噪比

假设在整个成像面上分布着具有相同 σ_o 的散射体, 并进一步假设 Γ_1 , Γ_2 和 Γ_3 分别是相干、完全不相干和部分相干散射体的百分比, 从前面的讨论中, 我们将下列 3 种不同类型的噪声加到来自稳定的散射体的信号中。

(1) 一个恒定的来自所有稳定的散射体 2 维噪声基底。成像系统的独立稳定散射体的数目是

$\Gamma_1 \times F_p / \rho_a \times \tau_r / \tau_o$ 。由式(16)并应用叠加原理, 信号与噪声的功率比是:

$$\begin{aligned} \text{SNR}_a &= \text{SNR}_1 \cdot \left(\frac{\Gamma_1 F_p}{\rho_a} \cdot \frac{\tau_r}{\tau_o} \right)^{-1} \\ &= \frac{T_o \cdot \rho_a}{\Gamma_1 \cdot \tau_r \cdot F_p} \rightarrow (36 - 10 \lg(\Gamma_1)) \text{ dB} \end{aligned} \quad (18)$$

(2) 一个恒定的来自所有时变散射体的 2 维噪声基底功率。成像系统的独立时变散射体的数目是 $(\Gamma_2 + \Gamma_3) \times D / \rho_a \times \tau_r / \tau_o$ 。由式(17)并应用叠加原理得出信号与噪声的功率比是:

$$\begin{aligned} \text{SNR}_b &= \text{SNR}_1 \cdot \left((\Gamma_2 + \Gamma_3) \cdot \frac{D}{\rho_a} \cdot \frac{\tau_r}{\tau_o} \right)^{-1} \\ &\rightarrow (26.8 - 10 \lg(\Gamma_2 + \Gamma_3)) \text{ dB} \end{aligned} \quad (19)$$

(3) 一个恒定的来自方位向的部分相干目标的 1 维噪声基底信号功率。处于相同斜距位置的这一类的所有独立散射体的噪声的非相干相加, 即方位向的 $D\Gamma_3 / \rho_a$ 1 维基底信号非相干相加, 由式(18)我们得到信噪比为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_c &= \text{SNR}_2 \cdot \left(\frac{D}{\rho_a} \Gamma_3 \right)^{-1} \\ &= \frac{T_o \cdot \rho_a}{\tau_c \cdot D \cdot \Gamma_3} \rightarrow (11.4 - 10 \lg(\Gamma_3)) \text{ dB} \end{aligned} \quad (20)$$

综合式(18), 式(19), 式(20), 总的信号噪声功率比有如下的表达式:

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{T_o \cdot \rho_a}{\Gamma_1 \tau_r X + \Gamma_2 \tau_r D + \Gamma_3 (\tau_r + \tau_c) D_r} \\ &\approx \frac{T_o \cdot \rho_a}{\Gamma_3 \tau_c D} = \text{SNR}_c \end{aligned} \quad (21)$$

总体上完全不相干的散射体所占的百分比是很小的, (即: $\Gamma_2 \approx 0$), 由此可以得出结论: 所述成像系统的信噪比的较低极限值是 11 dB 到 36 dB(取决于 $0 \leq \Gamma_3 \leq 1$)。这些极值是不同的, 因为, 在部分相干散射体的大背景中只有唯一的稳定的目标。

4 接收功率

据初步估算, 要使同步卫星接收机能够接收到地表反射的静止轨道卫星信号, 所需的静止轨道北斗卫星发射机的有效照射功率为 57 dB, 带宽为 $B_s=16.0$ MHz(对应着地面的功率约为 $P_g=-170$ dB/m²/Hz), 发射机的波束中心在零纬度, 中心频率是 $f_o=2.49175$ GHz, 且 $\sigma_o=-16$ dB, 卫星 B 接收到的功率为

$$P_r = \frac{P_g B}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot A_c \sigma_o \quad (22)$$

式(22)中, B 是接收机的带宽, G_r 是接收天线的增

益, A_c 是目标面积(地面分辨率像素, 在航迹方向是 ρ_a , 在垂直于航迹的斜距方向是 ρ_g , 分别取决于合成天线孔径和系统带宽 B 的倒数), 则接收机 B 处的功率(假设 B 与 A 在经度上分开 30°)为

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{P_g B}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \cdot \rho_a \cdot \rho_g \cdot \sigma_o \\ &\approx \frac{P_g}{4\pi R^2} \cdot A_r \cdot \rho_a \cdot \frac{c}{2 \sin(\pi/6)} \sigma_o \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中, A_r 是接收天线面积。应当注意到: 如果接收机的带宽 $B \leq B_s$, 所接收的功率 P_r 与地面距离分辨率无关, 否则, 所选择的地距分辨率 $\rho_g \geq c / (2B_s \sin(\pi/6)) = 18.75$ m。在带宽 B 中的信噪比 SNR 取决于天线的噪声温度 $T_a=290$ K^[6]、接收机的噪声系数 $F_n=7$ dB(即: 系统的温度近似 $F_n T_a=1500$ k)和 Boltzman 常数 k :

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{P_n} = \frac{P_r}{F_n k T_a B} \quad (24)$$

将所接收的信号和噪声对 T_o 平均, 我们得到一个等价的 $1/T_o$ 的噪声带宽^[11]

$$\text{SNR}_{\text{foc}} = \frac{P_r T_o}{F_n k T_a} \quad (25)$$

式(25)中的 T_o 可以表示合成天线的长度 A_s 除以恒定的接收机速度 v_B :

$$T_o = \frac{A_s}{v_B} = \frac{\lambda R}{\rho_a v_B} \quad (26)$$

信噪比 SNR 增益应归于散射信号的长的积分时间、与原始信号的互相关后重新赋予的相位以及由于距离的变化引起的补偿相位。天线的另一边长度由所观测的成像带宽 $W_g=1500$ km 得:

$$L_a = \frac{\lambda R}{W_g \cos \eta} = \frac{0.12 \times 36000 \times 10^3}{1500 \times 10^3 \times \cos(\pi/6)} = 3.3 \text{ m} \quad (27)$$

则天线面积为 $A_r=6.25 \times 3.3 \approx 21$ m²。将式(23)和式(26)代入到式(25)得到:

$$\text{SNR}_{\text{foc}} = \frac{\lambda c P_g A_r \sigma_o}{8\pi R F_n k T_a v_B \sin(\pi/6)} \quad (28)$$

应用前面所给数据有:

$$10 \lg \text{SNR}_{\text{foc}} = 8.47 \text{ dB} \quad (29)$$

前面的成像时间、成像分辨率等参数的探究是基于同步轨道卫星 B 的轨道倾角 i_o 约为 0.06794° 的情况下开展的, 由以上论述, 若对 72 km 范围的区域图像进行成像, 则所需要的成像时间约为 $T_o=8$ h。可见, 除去卫星相对速度接近零时的那段时间, 每天

可以产生两幅感兴趣面积的稳定散射体的合成孔径雷达图像。实际上还可以根据需求,将被观测的地面扩展到中国及其周边地区以外的区域,这样就势必要适当增加卫星 *B* 的轨道倾角,从而会导致卫星 *B* 的运动速度显著增大,多普勒效应更显著,缩短成像时间,这样,每天可以产生多于两幅的遥感图像。

5 一些可能的应用展望

由于地球同步轨道的周期恰好是一个恒星日,它可以每隔 24 h 重复观测特定地区的地表,可以以几小时的时间分辨率提供观测面积的合成孔径干涉图像,这些图像对于研究地球表面特征的短暂现象是非常有用的;另外,虽然由一颗同步轨道卫星构成的合成孔径雷达系统只能观测地球表面的三分之一,但却可以通过选择同步卫星的经度来按照人们的需求对特定面积的地表进行观测,这些特点以及由上述推导得出的分辨率特征,使得该系统可以灵活地应用在土壤湿度探测、地表演化的时空动力学特征研究、大气特性研究等方面。

5.1 土壤湿度准确探测

土壤湿度是农作物和天然植被生长状态评估的一个重要参量,但通常的对地观测方法难以准确测量,应用合成孔径干涉图像的强度和相位信息可以高精度地提取土壤的湿度信息^[12],因本文所述系统可以每天重访一次地球,可以从接收的散射信号中提取大于 55% 的有用信息,而基于低地球轨道卫星的合成孔径雷达则需每隔几天甚至几周才能重访地球一次,最多只能从接收的散射信号中提取 22% 的有用信息^[13],这是因为土壤湿度的时间依赖性很强,随着季节、地理环境的变化显著,这一点很重要,通过土壤湿度的实时测量可以及时准确地评估农作物生长态势以及植被的生长和变化情况。

5.2 地表面形变化的时空动力学特征研究

目前用来研究地表面形变化和位移的干涉测量技术是基于低轨道卫星的合成孔径雷达干涉图像,但这种方法受时间基线的限制,约需几周才能成像,这样对于研究象火山和地震活动过程中的时空动力学特征显然是不够的,而基于同步轨道卫星的合成孔径雷达可以每天提供所观测地区的干涉图像,提供的地形变化和位移的信息要丰富得多,为地震和火山爆发预报提供更准确的信息。

5.3 大气监测

如果系统的空间分辨率从 $72 \times 72 \text{ m}^2$ 降低到 $1 \times 1 \text{ km}^2$,积分时间可以减少因子 $(1000/72)^2 \sim 192$,从 8 h 降低到 5 min,就可以监测和识别大气的气象学效应,给政府和气象等部门提供气象预测信息。

大气中的对流层和电离层对电磁波的传播有重要的影响,会引起信号传播路径的弯折、信号的到达时间延迟等效应,这些效应随着地点和时间的不同而呈复杂的变化行为,例如,对流层和电离层的湍流会影响到信号的振幅、相位以及极化的变化,这些变化会反映到合成孔径的聚焦图像中来,经图像分析和处理可以获取大气对流层中的湿度成分、流体静力学特征、电离层中的总的电子容量等信息,从而给天气预报提供重要的参考信息。

除了上述所述的一些应用外,其他如海面监测、潮汐涨落等都可以有重要的应用。另外,如果利用机载 SAR 代替本文系统中的卫星 *B*,则可构成星-表双基 SAR (Space-Surface Bistatic SAR, SS-BSAR) 系统,具有更大的灵活性,同时,由于飞机低空飞行,降低了对发射机功率的要求,有助于提高信噪比,而且飞机本身不需要发射信号,有利于电子静默和隐身突袭,具有很高的军事应用价值。

6 结论

本文提出了一种依托于中国北斗卫星系统的合成孔径雷达成像方法,并从聚焦成像原理、稳定目标的脉冲响应、系统的信噪比和接收功率等方面阐述了系统建立的可行性。研究表明,这种系统只有目标的稳定持续时间达到 8 个小时的时间里能够成像,主要的应用领域在火山活动、地震等极为重要的自然灾害的及时监测。凡是在几毫秒时间里移动的物体几乎都不能成像。如果适当降低空间分辨率,成像时间可以缩短到小于半天,这会导致另外的一些感兴趣的应用领域(如大气监测等)。如果利用机载 SAR 代替本文系统中的卫星 *B*,则可构成星-表双基 SAR 系统,也具有非常广泛的应用价值。

本文所述成像方法也可以应用于其他的地球静止轨道的卫星,如定点于东经 98° ,工作于 C 波段的中国东方红三号(DFH-3)通信卫星。借助于现有的静止轨道的广播、通信卫星构造合成孔径对地成像观测是当前及未来国际上的一个研究热点^[13,14]。

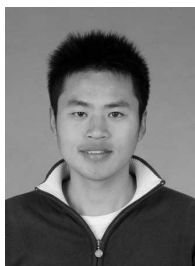
最后需要特别指出的是:本文提出的地球同步轨道合成孔径雷达与当前正在研究的同步轨道合成孔径雷达^[15,16]有本质的不同,前者是双站 SAR 系统,是对已有静止轨道卫星信号的再利用,且轨道倾角小,飞行速度慢,分辨率较低;后者是单站 SAR 系统,飞行速度快,分辨率较高。

参考文献

- [1] Elliott D. Kaplan and Christopher J. Hegarty. Understanding GPS-Principles and Applications[M]. Second Edition, Artech House, 2006, Ch. 11.

- [2] Tan Shu-sen, Zhou Bing, Guo Sheng-tao, *et al.* Studies of compass navigation signals design[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, 40: 514-519.
- [3] 中国卫星导航系统管理办公室. “北斗”卫星导航系统发展报告[R]. 国际太空, 2012, 4.
China Satellite Navigation Systems Management Office. Compass Navigation Satellite System development report [R]. Space International, 2012, 4.
- [4] John C. Curlander and Robert N. Mcdonough. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. New York, John Wiley & Sons, 1991, Ch. 1.
- [5] Ye Ji-hai, Jiang Yue-song, Zhao Ji-zhi, *et al.* Study of SAR imaging with COMPASS signal[J]. *Science China, Physics, Mechanics & Astronomy*, 2011, 54(6): 1051-1058.
- [6] 江月松, 王海洋, 等. 地球静止轨道光综合孔径相机的能耗与(u, v)覆盖研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 12-20.
Jiang Yue-song, Wang Hai-yang, *et al.* Studies on energy expending and (u, v) coverage for optical synthetic aperture camera on geosynchronous orbit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 12-20.
- [7] Dennis Roddy. Satellite Communication[M]. New York: McGraw-Hill, 2001, Ch. 1-3.
- [8] Laurence G. Taff. Computational Spherical Astronomy[M]. New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [9] Ian G. Cumming and Frank H. Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Artech House, 2005.
- [10] Cutrona L J. Synthetic Aperture Radar[M]. New York: McGraw-Hill, 1990, Ch. 21.
- [11] Lu Z and Meyer D J. Study of high SAR backscattering caused by an increase of soil moisture over a sparsely vegetated area: implications for characteristics of backscattering[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(6): 1063-1074.
- [12] Muldavin E. Sevilleta LTER Fertilizer NPP Study Dataset, Albuquerque, NM[DB]. Sevilleta Long Term Ecological Research Site Database, 2004.
- [13] Poulin D. Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 143-152.
- [14] Howland P E, Maksimiuk D, and Reitsma G. FM radio based bistatic radar[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 107-115.
- [15] Kiyu Tomiyasu and Jean L. Pacell. Synthetic aperture radar imaging from an inclined geosynchronous orbit [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, 21(3): 324-329.
- [16] Holt B and Hilland J. Rapid-repeat SAR imaging of the ocean surface: are daily observation possible? [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(1): 162-169.
- [17] He X, Cherniakov M, and Zeng T. Signal detectability in SS-BSAR with GNSS non-cooperative transmitters [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(3): 124-132.
- [18] Saini R. Problem of signal synchronisation in space-surface bistatic synthetic aperture radar based on global navigation satellite emissions-experimental results [J]. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2010, 4(1): 110-125.
- [19] Usman M and Armitage D W. A remote imaging system based on reflected GPS signals[C]. International Conference on Advances in Space Technologies, Islamabad, Pakistan, 2006: 173-178.

作者简介



王海洋(1986-), 男, 在读博士, 研究方向为压缩感知和综合孔径成像等。



江月松(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为被动综合孔径成像和微波光子学等方面的研究。