



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108564608 A
(43)申请公布日 2018.09.21

(21)申请号 201810365943.2

(22)申请日 2018.04.23

(71)申请人 中南大学

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

(72)发明人 李亚楠 马慧云 邹滨 陶超
冯徽徽 冉印泽

(74)专利代理机构 长沙正奇专利事务所有限责任公司 43113

代理人 马强 王娟

(51)Int.Cl.

G06T 7/41(2017.01)

G06T 7/62(2017.01)

G06T 5/10(2006.01)

G01W 1/10(2006.01)

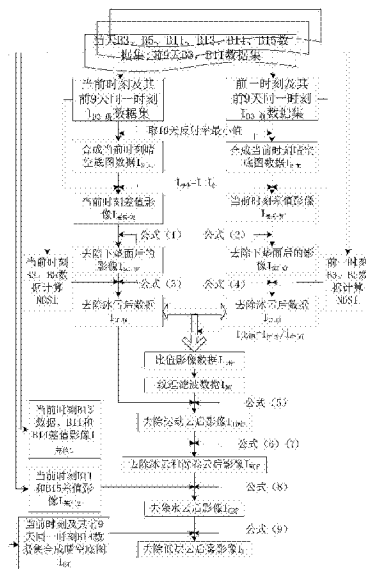
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

一种基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,首先利用多天可见光数据合成晴空底图,利用反射率差异,阈值法去除晴空地表;归一化雪指数法去除雪和不透明冰云;对去除晴空地表、雪和不透明冰云的前后时序影像做比值,固定阈值去除影像中运动的及类型变化较大的云;结合红外波段亮度温度的差异,阈值法进一步去除影像中的冰云、薄卷云和水云;最后利用多天红外数据合成晴空底图,阈值法去除影像中的低层云。本发明是当前具有高时间分辨率的静止卫星数据的条件下的一种可准确、高效快速实现白天雾提取的方法。



1. 一种基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,包括以下步骤:

- 1) 利用多天可见光数据合成晴空底图 I_R ,利用反射率差异,阈值法去除晴空地表,获取去除地表后的影像 I_{SCF} ;
- 2) 利用归一化雪指数法去除影像 I_{SCF} 中的雪和不透明冰云,获取去除后的影像 I_{CF} ;
- 3) 去除影像 I_{CF} 中纹理复杂且快速运动的云,获取雾检测影像 I_{ITWCF} ;
- 4) 去除影像 I_{ITWCF} 中冰云和薄卷云,获取去除后影像 I_{WCF} ;
- 5) 去除影像 I_{WCF} 中的水云,获取去除后影像 I_{C2F} ;
- 6) 利用多天红外数据合成晴空底图 I_{BT} ,利用晴空底图 I_{BT} 和阈值法去除影像 I_{C2F} 中的低层云,获取卫星雾检测结果 I_F 。

2. 根据权利要求1所述的基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,步骤1)的具体实现过程包括:

1) 利用多天可见光数据合成晴空底图,使用当天及前9天当前时刻和前一时刻可见光 I_{B3} 数据,结合可见光波段晴空地表反射率较云雾最低这一特征,分别合成晴空底图 $I_{R-现}$ 和 $I_{R-前}$;

2) 对当前时刻 $I_{B3-现}$ 数据与晴空合成底图 $I_{R-现}$ 做差,前一时刻 $I_{B3-前}$ 数据与晴空合成底图 $I_{R-前}$ 做差,分别获得差值影像 $I_{差值-现}$ 和 $I_{差值-前}$;

3) 对差值影像 $I_{差值-现}$ 和 $I_{差值-前}$ 采用固定阈值去除地表,再分别与原始影像 $I_{B3-现}$ 和 $I_{B3-前}$ 相乘,获取去除地表后的影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$:其中 $I_{SCF-现}$ 表示使用当前时刻数据获取的去除晴空地表后的影像 I_{SCF} ; $I_{SCF-前}$ 表示使用前一时刻数据获取的去除地表后影像 I_{SCF} 。

$$I_{SCF-现} = \begin{cases} 0 & I_{差值-现} \leq 0.05 \\ I_{B3-现} & I_{差值-现} > 0.05 \end{cases};$$

$$I_{SCF-前} = \begin{cases} 0 & I_{差值-前} \leq 0.05 \\ I_{B3-前} & I_{差值-前} > 0.05 \end{cases}。$$

3. 根据权利要求2所述的基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,步骤2)的具体实现过程包括:

1) 分别使用当前时刻 $I_{B3-现}$ 、 $I_{B5-现}$ 数据和前一时刻 $I_{B3-前}$ 、 $I_{B5-前}$ 数据,获取当前时刻和前一时刻归一化雪指数 $NDSI_{现}$ 和 $NDSI_{前}$,其中 $NDSI_{现} = (I_{B3-现} - I_{B5-现}) / (I_{B3-现} + I_{B5-现})$; $NDSI_{前} = (I_{B3-前} - I_{B5-前}) / (I_{B3-前} + I_{B5-前})$;

2) 对去除地表后的影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 使用归一化雪指数法,设置阈值0.4去除影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 中的雪和不透明冰云,分别与影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 相乘得到影像 $I_{CF-现}$ 和 $I_{CF-前}$:其中 $I_{CF-现}$ 表示使用当前时刻数据获取的去除雪和不透明冰云的影像 I_{CF} ; $I_{CF-前}$ 表示使用前一时刻数据获取的去除雪和不透明冰云的影像 I_{CF} 。

$$I_{CF-现} = \begin{cases} 0 & NDSI_{现} \geq 0.4 \\ I_{SCF-现} & NDSI_{现} < 0.4 \end{cases};$$

$$I_{CF-前} = \begin{cases} 0 & NDSI_{前} \geq 0.4 \\ I_{SCF-前} & NDSI_{前} < 0.4 \end{cases}。$$

4. 根据权利要求3所述的基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,步骤3)的具体实现过程包括:

1) 对当前时刻 $I_{CF-现}$ 数据和前一时刻 $I_{CF-前}$ 数据的B3波段做比值运算,获取比值影像 $I_{比值}$, $I_{比值} = I_{CF-现} / I_{CF-前}$;

2) 对比值影像 $I_{比值}$ 采用一阶概率纹理滤波法获取data rang纹理数据 I_{DR} ;

3) 设置阈值0.3去除影像 $I_{CF-现}$ 运动的及类型变化较大的云,与影像 $I_{CF-现}$ 相乘得到影像 I_{ITWCF} :
$$I_{ITWCF} : I_{ITWCF} = \begin{cases} 0 & I_{DR} \geq 0.3 \\ I_{CF-现} & I_{DR} < 0.3 \end{cases}.$$

5. 根据权利要求4所述的基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,步骤4)的具体实现过程包括:

1) 使用当前时刻 $I_{B13-现}$ 数据,设置阈值230k去除影像 I_{ITWCF} 冰云,与影像 I_{ITWCF} 相乘得到影像 I_{TWCF} :
$$I_{TWCF} : I_{TWCF} = \begin{cases} 0 & I_{B13-现} < 230 \\ I_{ITWCF} & I_{B13-现} \geq 230 \end{cases};$$

2) 对当前时刻 $I_{B11-现}$ 数据和 $I_{B14-现}$ 数据做差值运算,获取差值影像 $I_{差值1}$, $I_{差值1} = I_{B11-现} - I_{B14-现}$;

3) 设置阈值0去除影像 I_{TWCF} 中的薄卷云,与影像 I_{TWCF} 相乘得到影像 I_{WCF} :

$$I_{WCF} = \begin{cases} 0 & I_{差值1} > 0 \\ I_{TWCF} & I_{差值1} \leq 0 \end{cases}.$$

6. 根据权利要求5所述的基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,步骤5)的具体实现过程包括:

1) 对当前时刻 $I_{B15-现}$ 数据和 $I_{B11-现}$ 数据做差值运算,获取差值影像 $I_{差值2}$, $I_{差值2} = I_{B15-现} - I_{B11-现}$;

2) 使用归一化阈值 V_t 去除影像 I_{WCF} 中水云,与影像 I_{WCF} 相乘得到影像 I_{C2F} :

$$I_{C2F} = \begin{cases} 0 & I_{差值2} < V_t \\ I_{WCF} & I_{差值2} \geq V_t \end{cases};$$

其中, $V_t = \frac{0.65}{\cos\theta}$; θ 为太阳高度角。

7. 根据权利要求6所述的基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,其特征在于,步骤6)的具体实现过程包括:

1) 使用当天及前9天当前时刻B14数据合成晴空底图 I_{BT} ;

2) 对当前时刻 $I_{B14-现}$ 数据与晴空底图 I_{BT} 做差,获取差值的绝对值影像 $I_{差值3}$, $I_{差值3} = I_{B14-现} - I_{BT}$;

3) 采用阈值法去除影像 I_{C2F} 中的低层云,与 I_{C2F} 相乘获取最终卫星雾检测结果 I_F :

$$I_F = \begin{cases} 0 & I_{差值3} > 11 \\ I_{C2F} & I_{差值3} \leq 11 \end{cases}.$$

一种基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及环境监测与气象预报领域,特别涉及一种基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法。

背景技术

[0002] 雾是一种灾害性天气现象,它会降低能见度、恶化空气质量,对交通安全尤其是航海、航空和高速公路运输等方面有较严重影响。随着卫星遥感技术的快速发展,相对传统雾检测,遥感技术雾检测具有明显的优势,主要体现在数据更新快、时效性高、检测范围大和技术成本低等方面。基于遥感技术雾检测主要使用极轨卫星数据(如TERRA/MODIS、NOAA/AVHRR),极轨卫星数据具有光谱信息丰富的特点,但过境时间(白天上午10:30、白天下午2:30、晚上22:30和凌晨2:30)与雾生成期有一定的延迟,时间分辨率(一天获取2-4幅数据)较低,难以满足雾检测近实时快速响应的要求。静止卫星时间分辨率高,可对研究区域连续观测,尤其是生命周期短、变化快的雾,但以往的静止卫星(GMS-5、Meteosat 8和MTSAT-1R等)空间分辨率和光谱分辨率较低,难以进行雾的精准检测。日本新一代静止气象卫星葵花8号(Himawari-8,简称H8)主载荷(AHI)具有全盘和区域扫描能力,能在10分钟内完成全盘扫描,成像仪通道从 $0.46\mu\text{m}$ - $13.3\mu\text{m}$ 共16个通道,空间分辨率最高达500m,相比于早期静止卫星,其时间分辨率(10分钟),光谱分辨率(16个通道)和空间分辨率(500m)均有较大提高。H8/AHI数据为雾变化检测提供了一个良好的数据源^[1],同时也对雾近实时快速提取技术提出了更高的要求。

[0003] 由于受到遥感数据时间分辨率、资金、设备等因素的影响,纵观国内外雾检测研究现状,雾近实时准确快速提取仍有一定困难。相比以往静止气象卫星,H8/AHI数据独特的特性为雾近实时快速提取提供了良好的数据源,因此发明一种基于H8/AHI的白天雾检测算法减少因雾造成的财产和生命损失是十分必要和迫切的。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是,针对现有技术不足,提供一种基于H8/AHI的白天雾快速提取的方法,能快速、准确地检测白天雾,减少因雾造成的财产和生命损失。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明所采用的技术方案是:步骤1:利用多天可见光数据合成晴空底图 I_R ,利用反射率差异,阈值法去除晴空地表,获取去除地表后的影像 I_{SCF} ;

[0006] 步骤2:归一化雪指数法去除影像 I_{SCF} 中的雪和不透明冰云,获取去除后的影像 I_{CF} ;

[0007] 步骤3:去除影像 I_{CF} 中纹理复杂且快速运动的云,获取雾检测影像 I_{ITWCF} ;

[0008] 步骤4:去除影像 I_{ITWCF} 中冰云和薄卷云,获取去除后影像 I_{WCF} ;

[0009] 步骤5:去除影像 I_{WCF} 中水云,获取去除后影像 I_{C2F} ;

[0010] 步骤6:利用多天红外数据合成晴空底图 I_{BT} ,阈值去除影像 I_{C2F} 中的低层云,获取卫星雾检测结果 I_F ;

[0011] 所述的利用多天可见光数据合成晴空底图 I_R ，阈值法去除晴空地表，获取去除地表后的影像 I_{SCF} ，包括以下步骤：

[0012] 利用多天可见光数据合成晴空底图，使用当天及前9天当前时刻和前一刻可见光 I_{B3} 数据，结合可见光波段晴空地表反射率较云雾最低这一特征，分别合成晴空底图 $I_{R-现}$ 和 $I_{R-前}$ ；

[0013] 对当前时刻 $I_{B3-现}$ 数据与晴空合成底图 $I_{R-现}$ 做差，前一刻 $I_{B3-前}$ 与晴空合成底图 $I_{R-前}$ 做差，分别获得差值影像 $I_{差值-现}$ 和 $I_{差值-前}$ ；

[0014] 对差值影像采用固定阈值(阈值设置为0.05)快速去除地表，分别与原始影像 $I_{B3-现}$ 和 $I_{B3-前}$ 相乘获取去除地表后的影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ ；其中 $I_{SCF-现}$ 表示使用当前时刻数据获取的去除晴空地表后的影像 I_{SCF} ； $I_{SCF-前}$ 表示使用前一刻数据获取的去除地表后影像 I_{SCF} ；

$$[0015] \quad I_{SCF-现} = \begin{cases} 0 & I_{差值-现} \leq 0.05 \\ I_{B3-现} & I_{差值-现} > 0.05 \end{cases} \quad (1)$$

$$[0016] \quad I_{SCF-前} = \begin{cases} 0 & I_{差值-前} \leq 0.05 \\ I_{B3-前} & I_{差值-前} > 0.05 \end{cases} \quad (2)$$

[0017] 所述的归一化雪指数法去除影像 I_{SCF} 中的雪和不透明冰云，获取去除后的影像 I_{CF} ，包括以下步骤：

[0018] 分别使用当前时刻 $I_{B3-现}$ 、 $I_{B5-现}$ 和前一刻 $I_{B3-前}$ 、 $I_{B5-前}$ 数据，获取当前时刻和前一刻归一化雪指数 $NDSI_{现}$ 和 $NDSI_{前}$ ， $NDSI_{现} = (I_{B3-现} - I_{B5-现}) / (I_{B3-现} + I_{B5-现})$ ； $NDSI_{前} = (I_{B3-前} - I_{B5-前}) / (I_{B3-前} + I_{B5-前})$ ；

[0019] 对去除地表后的影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 使用归一化雪指数法，设置阈值0.4去除影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 中雪和不透明冰云，分别与影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 相乘得到影像 $I_{CF-现}$ 和 $I_{CF-前}$ ；其中 $I_{CF-现}$ 表示使用当前时刻数据获取的去除雪和不透明冰云的影像 I_{CF} ； $I_{CF-前}$ 表示使用前一刻数据获取的去除雪和不透明冰云的影像 I_{CF} 。

$$[0020] \quad I_{CF-现} = \begin{cases} 0 & NDSI_{现} \geq 0.4 \\ I_{SCF-现} & NDSI_{现} < 0.4 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0021] \quad I_{CF-前} = \begin{cases} 0 & NDSI_{前} \geq 0.4 \\ I_{SCF-前} & NDSI_{前} < 0.4 \end{cases} \quad (4)$$

[0022] 所述的去除影像 I_{CF} 中纹理复杂且快速运动的云，获取雾检测影像 I_{TWCF} ，包括以下步骤：

[0023] 对当前时刻 $I_{CF-现}$ 数据和前一刻 $I_{CF-前}$ 数据的B3波段做比值运算，获取比值影像 $I_{比值}$ ， $I_{比值} = I_{CF-现} / I_{CF-前}$ ；

[0024] 对比值影像 $I_{比值}$ 采用一阶概率纹理滤波法获取data range(数据范围)纹理数据 I_{DR} ；

[0025] 设置阈值0.3去除影像 $I_{CF-现}$ 中运动的及类型变化较大的云，与影像 $I_{CF-现}$ 相乘得到影像 I_{ITWCF} ；

$$[0026] \quad I_{ITWCF} = \begin{cases} 0 & I_{DR} \geq 0.3 \\ I_{CF-现} & I_{DR} < 0.3 \end{cases} \quad (5)$$

[0027] 所述的去除影像 I_{ITWCF} 中冰云和薄卷云，获取去除后影像 I_{WCF} ，包括以下步骤：

[0028] 使用当前时刻 $I_{B13-现}$ (中心波段:10.4um)数据,设置阈值230k去除影像 I_{ITWCF} 中冰云,与影像 I_{ITWCF} 相乘得到影像 I_{TWCF} ;

$$[0029] \quad I_{TWCF} = \begin{cases} 0 & I_{B13-现} < 230 \\ I_{ITWCF} & I_{B13-现} \geq 230 \end{cases} \quad (6)$$

[0030] 对当前时刻 $I_{B11-现}$ (中心波段:8.7um)数据和 $I_{B14-现}$ (中心波段:11.2um)数据做差值运算,获取差值影像 $I_{差值1}$, $I_{差值1} = I_{B11-现} - I_{B14-现}$;

[0031] 设置阈值0k去除影像 I_{TWCF} 中薄卷云,与影像 I_{TWCF} 相乘得到影像 I_{WCF} ;

$$[0032] \quad I_{WCF} = \begin{cases} 0 & I_{差值1} > 0 \\ I_{TWCF} & I_{差值1} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

[0033] 所述的去除影像 I_{WCF} 中水云,获取去除后影像 I_{C2F} ,包括以下步骤:

[0034] 对当前时刻 $I_{B15-现}$ (中心波长:12.3um)数据和 $I_{B11-现}$ 数据做差值运算,获取差值影像 $I_{差值2}$, $I_{差值2} = I_{B15-现} - I_{B11-现}$;

[0035] 其阈值依赖太阳高度角 θ 的变化,所以归一化处理获取动态阈值 V_t , $V_t = \frac{0.65}{\cos\theta}$;

[0036] 使用归一化阈值 V_t 去除影像 I_{WCF} 中水云,与影像 I_{WCF} 相乘得到影像 I_{C2F} ;

$$[0037] \quad I_{C2F} = \begin{cases} 0 & I_{差值2} < V_t \\ I_{WCF} & I_{差值2} \geq V_t \end{cases} \quad (8)$$

[0038] 所述的利用多天红外数据合成晴空底图 I_{BT} ,阈值法去除影像 I_{C2F} 中的低层云,获取卫星雾检测结果 I_F ,包括以下步骤:

[0039] 利用热红外波段中,晴空地表亮度温度大于云雾的亮度温度这一特征,使用当天及前9天当前时刻 $I_{B14-现}$ 数据合成晴空底图 I_{BT} ;

[0040] 对当前时刻 $I_{B14-现}$ 数据与晴空底图 I_{BT} 做差,获取差值的绝对值影像 $I_{差值3}$, $I_{差值3} = I_{B14-现} - I_{BT}$;

[0041] 采用阈值法(设置阈值11)快速去除影像 I_{C2F} 中低层云,与影像 I_{C2F} 相乘获取最终卫星雾检测结果 I_F ;

$$[0042] \quad I_F = \begin{cases} 0 & I_{差值3} > 11 \\ I_{C2F} & I_{差值3} \leq 11 \end{cases} \quad (9)$$

[0043] 与现有技术相比,本发明所具有的有益效果为:本发明是当前具有高时间分辨率的静止卫星数据的条件下的一种可准确、高效快速实现白天雾提取的方法,检测结果可靠,精度高。

附图说明

[0044] 图1示出了基于H8/AHI的白天雾检测算法流程;

[0045] 图2示出了卫星雾检测结果与地面观测数据叠加图;其中,(a)8:00卫星雾检测结果与地面观测数据叠加图;(b)14:00卫星雾检测结果与地面观测数据叠加图;注:黑色区域为卫星雾检测结果;不同形状表示地面站点不同观测结果☆:特浓雾、▲:浓雾、●:雾、×:非雾;

[0046] 图3示出了雾检测结果与H8/AHI假彩色影像叠加图;其中,(a)8:00雾检测结果;

(b) 9:00雾检测结果; (c) 10:00雾检测结果; (d) 11:00雾检测结果; (e) 12:00雾检测结果; (f) 13:00雾检测结果; (g) 14:00雾检测结果; (h) 15:00雾检测结果; (i) 16:00雾检测结果;
[0047] 图4式出了可见光波段雾和地表反射率差异图。

具体实施方式

[0048] 以下结合附图对本发明进行详细说明。

[0049] 1、利用多天可见光数据合成晴空底图, 阈值法去除晴空地表, 获取去除地表后的影像 I_{SCF} ;

[0050] 实验使用2015年11月16日-2015年12月1日H8/AHI卫星2km空间分辨率10分钟时间分辨率的时序影像 I_{B3} 数据, 分别合成晴空底图 $I_{R-现}$ 和 $I_{R-前}$;

[0051] 对当前时刻 $I_{B3-现}$ 数据与晴空合成底图 $I_{R-现}$ 做差, 前一时刻 $I_{B3-前}$ 数据与晴空合成底图 $I_{R-前}$ 做差, 分别获得差值影像 $I_{差值-现}$ 和 $I_{差值-前}$;

[0052] 对差值影像采用固定阈值(阈值设置为0.05)快速去除地表, 分别与原始影像 $I_{B3-现}$ 和 $I_{B3-前}$ 相乘获取去除地表后的影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$; 其中 $I_{SCF-现}$ 表示使用当前时刻数据获取的去除晴空地表后的影像 I_{SCF} ; $I_{SCF-前}$ 表示使用前一时刻数据获取的去除地表后影像 I_{SCF} ;

$$[0053] \quad I_{SCF-现} = \begin{cases} 0 & I_{差值-现} \leq 0.05 \\ I_{B3-现} & I_{差值-现} > 0.05 \end{cases} \quad (1)$$

$$[0054] \quad I_{SCF-前} = \begin{cases} 0 & I_{差值-前} \leq 0.05 \\ I_{B3-前} & I_{差值-前} > 0.05 \end{cases} \quad (2)$$

[0055] 2、归一化雪指数法去除影像 I_{SCF} 中的雪和不透明冰云, 获取去除后的影像 I_{CF} ;

[0056] 分别使用2015年11月26日-12月1日当前时刻 $I_{B3-现}$ 、 $I_{B5-现}$ 和前一时刻 $I_{B3-前}$ 、 $I_{B5-前}$ 数据, 获取当前时刻和前一时刻归一化雪指数 $NDSI_{现}$ 和 $NDSI_{前}$, $NDSI_{现} = (I_{B3-现} - I_{B5-现}) / (I_{B3-现} + I_{B5-现})$; $NDSI_{前} = (I_{B3-前} - I_{B5-前}) / (I_{B3-前} + I_{B5-前})$;

[0057] 对去除地表后的影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 使用归一化雪指数法, 设置阈值0.4去除影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 中的雪和不透明冰云, 分别与影像 $I_{SCF-现}$ 和 $I_{SCF-前}$ 相乘得到影像 $I_{CF-现}$ 和 $I_{CF-前}$; 其中 $I_{CF-现}$ 表示使用当前时刻数据获取的去除雪和不透明冰云的影像 I_{CF} ; $I_{CF-前}$ 表示使用前一时刻数据获取的去除雪和不透明冰云的影像 I_{CF} 。

$$[0058] \quad I_{CF-现} = \begin{cases} 0 & NDSI_{现} \geq 0.4 \\ I_{SCF-现} & NDSI_{现} < 0.4 \end{cases} \quad (3)$$

$$[0059] \quad I_{CF-前} = \begin{cases} 0 & NDSI_{前} \geq 0.4 \\ I_{SCF-前} & NDSI_{前} < 0.4 \end{cases} \quad (4)$$

[0060] 3、去除影像 I_{CF} 中纹理复杂且快速运动的云, 获取雾检测影像 I_{ITWCF} ;

[0061] 对当前时刻 $I_{CF-现}$ 数据和前一时刻 $I_{CF-前}$ 数据的B3波段做比值运算, 获取比值影像 $I_{比值}$, $I_{比值} = I_{CF-现} / I_{CF-前}$;

[0062] 对比值影像 $I_{比值}$ 采用一阶概率纹理滤波法获取data range(数据范围)纹理数据 I_{DR} ;

[0063] 设置阈值0.3去除影像 $I_{CF-现}$ 中运动的及类型变化较大的云, 与影像 $I_{CF-现}$ 相乘得到影像 I_{ITWCF} ;

$$[0064] \quad I_{ITWCF} = \begin{cases} 0 & I_{DR} \geq 0.3 \\ I_{CF-现} & I_{DR} < 0.3 \end{cases} \quad (5)$$

[0065] 4、去除影像 I_{ITWCF} 中冰云和薄卷云,获取去除后影像 I_{WCF} ;

[0066] 使用2015年11月26日-12月1日当前时刻 $I_{B13-现}$ (中心波段:10.4um)数据,设置阈值230k去除影像 I_{ITWCF} 中冰云,与影像 I_{ITWCF} 相乘得到影像 I_{TWCF} ;

$$[0067] \quad I_{TWCF} = \begin{cases} 0 & I_{B13-现} < 230 \\ I_{ITWCF} & I_{B13-现} \geq 230 \end{cases} \quad (6)$$

[0068] 对2015年11月26日-12月1日当前时刻 $I_{B11-现}$ (中心波段:8.7um)数据和 $I_{B14-现}$ (中心波段:11.2um)数据做差值运算,获取差值影像 $I_{差值1}$, $I_{差值1} = I_{B11-现} - I_{B14-现}$;

[0069] 设置阈值0k去除影像 I_{TWCF} 中薄卷云,与影像 I_{TWCF} 相乘得到影像 I_{WCF} ;

$$[0070] \quad I_{WCF} = \begin{cases} 0 & I_{差值1} > 0 \\ I_{TWCF} & I_{差值1} \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

[0071] 5、去除影像 I_{WCF} 中水云,获取去除后影像 I_{C2F} ;

[0072] 对2015年11月26日-12月1日当前时刻 $I_{B15-现}$ (中心波长:12.3um)数据和 $I_{B11-现}$ 数据做差值运算,获取差值影像 $I_{差值2}$, $I_{差值2} = I_{B15-现} - I_{B11-现}$;

[0073] 其阈值依赖太阳高度角 θ 的变化,所以归一化处理获取动态阈值 V_t , $V_t = \frac{0.65}{\cos\theta}$;

[0074] 使用归一化阈值 V_t 去除影像 I_{WCF} 中水云,与影像 I_{WCF} 相乘得到影像 I_{C2F} ;

$$[0075] \quad I_{C2F} = \begin{cases} 0 & I_{差值2} < V_t \\ I_{WCF} & I_{差值2} \geq V_t \end{cases} \quad (8)$$

[0076] 6、利用多天红外数据合成晴空底图 I_{BT} ,阈值去除影像 I_{C2F} 中的低层云,获取卫星雾检测结果 I_F ;

[0077] 使用2015年11月16日-12月1日当前时刻 I_{B14} 数据合成晴空底图 I_{BT} ;

[0078] 对2015年11月26日-12月1日当前时刻 $I_{B14-现}$ 数据与晴空底图 I_{BT} 做差,获取差值的绝对值影像 $I_{差值3}$, $I_{差值3} = I_{B14-现} - I_{BT}$;

[0079] 采用阈值法(设置阈值11)快速去除影像 I_{C2F} 中的低层云,与 I_{C2F} 相乘获取最终卫星雾检测结果 I_F ;

$$[0080] \quad I_F = \begin{cases} 0 & I_{差值3} > 11 \\ I_{C2F} & I_{差值3} \leq 11 \end{cases} \quad (9)$$

[0081] 7、检测结果精度定量验证

[0082] 选取中国气象局2015年11月26日-2015年12月1日白天卫星影像对应时刻8:00和14:00的地面观测数据,验证白天雾检测算法的精度,图2示出了8:00卫星雾检测结果大约占整个雾区20%左右,其余5天8:00-9:00不同时刻白天雾检测结果不超过整个雾区40%;说明使用实验提出的白天雾检测算法此时间段检测效果不佳,进而说明在太阳高度角较低情况下获取的数据此算法不适用;14:00遥感雾检测结果与地面站点数据中的特浓雾、浓雾和雾区基本一致,使用精度指标进一步验证算法的有效性。

[0083] 为进一步验证算法的有效性,对检测结果进行定量精度指标评价。常用指标评价体系评价分类的精度,验证算法的有效性^[12],其中检验指标包括正确率

(probability of detection, POD), 误警率 (false alarm ratio, FAR) 和可靠性因子 (critical success index, CSI)。这些指标定义为:

$$[0084] \quad \text{POD} = \frac{N_H}{N_H + N_M} \quad (10)$$

$$[0085] \quad \text{FAR} = \frac{N_F}{N_H + N_F} \quad (11)$$

$$[0086] \quad \text{CSI} = \frac{N_H}{N_H + N_M + N_F} \quad (12)$$

[0087] 式中: N_x 为检测个数, 其下标 x 为检测指标种类, 包括 H , M 和 F (H 表示卫星检测结果与地面观测结果一致, 即正确检测; M 表示卫星检测结果中没雾而地面数据显示有雾, 即失误检测; F 表示卫星检测结果中有雾而地面数据显示没雾, 即错误检测)。上述检测指标范围均为 $0-1$, POD 越大表示检测精度越高; CSI 越大说明方法越有效。

[0088] 表1式出6天中14:00卫星雾检测正确率平均值为96.6%, 错误率平均值为9.4%, 可靠性因子平均值为87.9%。分析其检测错误原因如下: 2015年11月27日14:00的遥感影像中存在少量小面积雾处于消散阶段, 已逐步抬升成为低层云, 此时地面能见度升高, 地面观测站判定此区域无雾; 而遥感影像上易被当做雾检测出来造成虚假报警。因此若对大面积雾进行检测, 算法的正确性和可靠性因子均较高, 但对于抬升为低层云的情况, 算法易虚假报警。

[0089] 表1白天雾检测精度

[0090]

日期	类别	地面数据有雾	地面数据非雾	POD	FAR	CSI
2015年11月 26日	卫星检测有雾	1	12	1	0.923	0.077
	卫星检测非雾	0	945			

[0091]

2015年11月 27日	卫星检测有 雾	63	40	1	0.388	0.612
	卫星检测非 雾	0	855			
2015年11月 28日	卫星检测有 雾	56	17	0.903	0.233	0.709
	卫星检测非 雾	6	879			
2015年11月 29日	卫星检测有 雾	139	10	1	0.067	0.933
	卫星检测非 雾	0	809			
2015年11月 30日	卫星检测有 雾	268	29	0.954	0.098	0.865
	卫星检测非 雾	13	648			
2015年12月 1日	卫星检测有 雾	160	3	0.941	0.018	0.925
	卫星检测非 雾	10	785			

[0092] 8、检测结果精度定性验证

[0093] 雾具有时间连续性和空间位置变化较小的特性,因此对地面观测站点8:00 和14:00确定为雾的区域,可认为此时间段内其他时刻该区域也是雾,图3示出了2015年11月30号8:00-16:00雾检测结果,定性验证算法的精度。

[0094] 由图3可知:8:00卫星雾检测面积大约占整个雾区20%左右,8:00-9:00其他时刻

雾检测面积不超过整个雾区60%，同时15:00-16:00雾检测面积随时间逐渐减小，16:00雾检测面积约占整个雾区15%左右；说明使用本文提出的算法对太阳高度角较低的时段（8:00-9:00,15:00-16:00）数据检测效果不佳；而白天时间段（9:00-15:00）雾检测结果占整个雾区90%以上，雾检测结果较好。

[0095] 为进一步分析算法的适用时间段，选取2015年11月30日8:00-16:00的遥感数据进行了雾反射率，地表反射率及其差值的统计分析，见图4。日出前后（8:00-9:00），太阳高度角较低，地表和雾顶接收到的太阳辐射较少，此时地表和雾在可见光波段反射率差异较小（低于0.05），日出后日落前（9:00-15:00）太阳高度角升高，雾和地表反射率持续升高，此时地表和雾在可见光波段反射率差异较大（高于0.05），而日落前（15:00-16:00）太阳高度角降低，雾与地表的反射率的差值小于0.05。本发明从理论上分析了该算法得适用时间段（9:00-15:00），与图3中雾检测结果较好的时段一致。

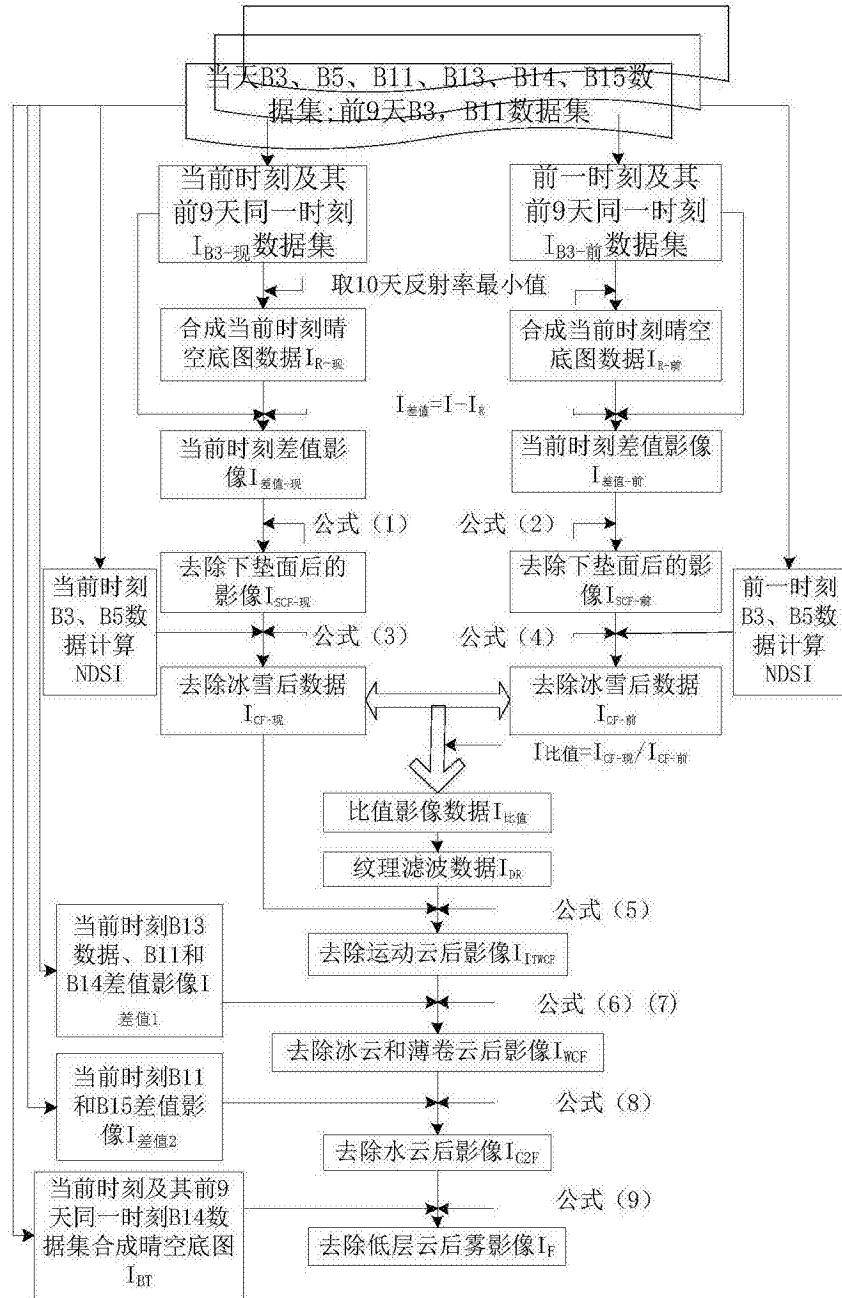
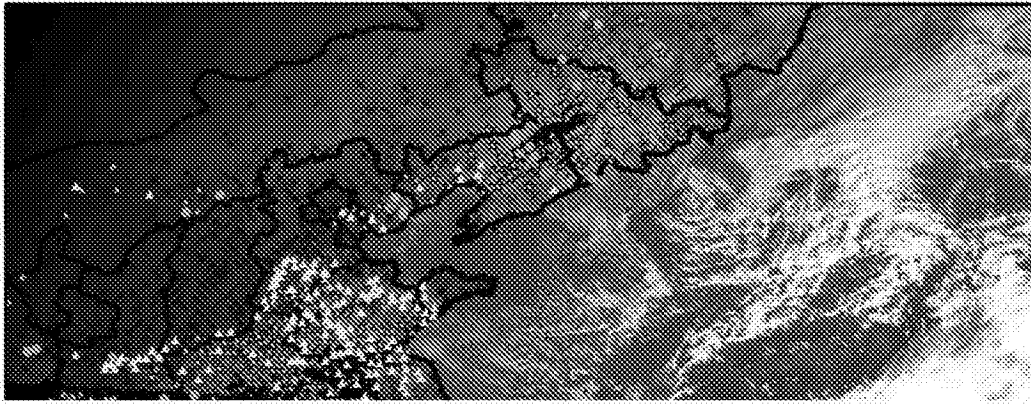
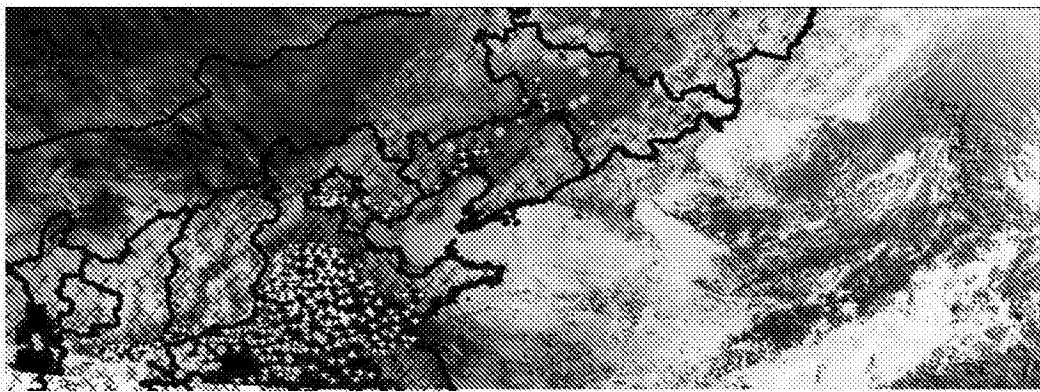


图1



(a)



(b)

图2



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

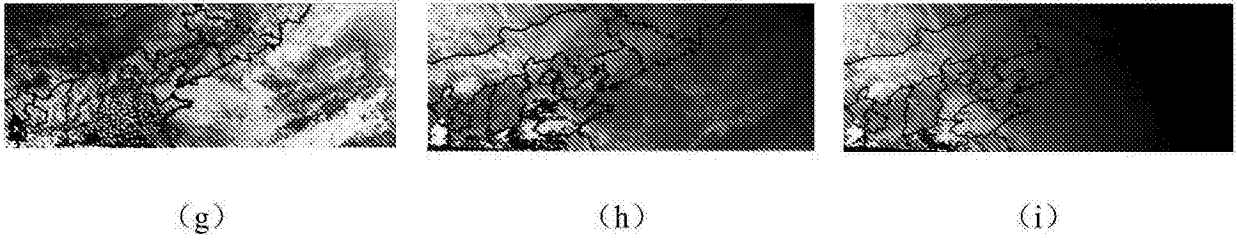


图3

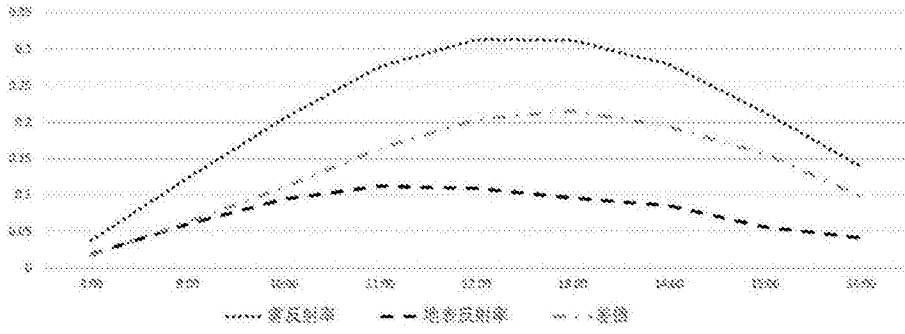


图4